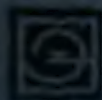


П. А. ТОРОШИН

# **М**ЕТАЛЛО- БУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ



П. А. ТОРОЩИН

# МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

*Под редакцией и с дополнениями  
доктора технических наук  
проф. В. Т. РЕННЕ*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»  
МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

*В книге излагаются теоретические основы, принципиальные особенности и технология изготовления металlobумажных конденсаторов. Значительное внимание уделено электрическим и эксплуатационным характеристикам.*

*Книга предназначена для инженеров и техников, занимающихся изготовлением металlobумажных конденсаторов, а также для широкого круга специалистов, использующих металlobумажные конденсаторы в разрабатываемой и выпускаемой ими аппаратуре.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Советское конденсаторостроение за послевоенные годы вступило в новый период своего развития. Создание специализированных конденсаторостроительных заводов способствовало росту механизации и автоматизации производства и на ее основе — быстрому развитию конденсаторостроения.

Особенно быстро развивается выпуск металlobумажных конденсаторов, которые благодаря малым удельным объемам и хорошим электрическим характеристикам нашли широкое применение в различных отраслях техники и в особенности в малогабаритной передвижной радиоаппаратуре, а также в других радиотехнических устройствах с большой насыщенностью радиодетальями.

Автор поставил себе задачу помочь работникам, занимающимся изготовлением металlobумажных конденсаторов, овладеть этой новой отраслью радиодеталестроения, а работникам, применяющим металlobумажные конденсаторы, — получить более полное представление о специфических свойствах и особенностях этих конденсаторов с целью более рационального их использования.

Если книга окажется полезной тем, кто изготавливает и использует металlobумажные конденсаторы, и будет в какой-то мере способствовать общему прогрессу советского конденсаторостроения, автор будет считать свою задачу выполненной.

В процессе подготовки рукописи большую помощь оказали автору рецензент Л. Н. Закгейм, который взял на себя также значительную долю труда по написанию

первой и второй глав, и научный редактор В. Т. Ренне, который, помимо редактирования, дополнил рукопись параграфами 4, 6, 8, 38 и 43, а также составил основную часть библиографического списка; автор выражает им свою благодарность.

Автор будет весьма признателен за критические замечания по вопросам, затронутым в данной книге. Все замечания автор просит направлять в издательство по адресу: Ленинград, Марсово поле, 1, издательство «Энергия».

*Автор*

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Введение . . . . .                                                                                                                                        | 7         |
| <b>Глава первая. Теоретические основы конструкции и технологии металлобумажных конденсаторов . . . . .</b>                                                | <b>13</b> |
| § 1. Тонкие металлические слои на диэлектриках . . . . .                                                                                                  | —         |
| § 2. Выбор металла и метода металлизации диэлектрика при изготовлении конденсаторов . . . . .                                                             | 16        |
| § 3. Механизм самовосстановления изоляции конденсаторов при пробое или коротком замыкании по проводящему включению . . . . .                              | 19        |
| § 4. Электрохимическое самовосстановление в конденсаторах с металлизированным диэлектриком . . . . .                                                      | 29        |
| § 5. Влияние толщины обкладки на электрические характеристики металлобумажного конденсатора . . . . .                                                     | 31        |
| § 6. Влияние структуры металлического слоя на качество металлобумажного конденсатора . . . . .                                                            | 34        |
| § 7. Лаковое покрытие на бумаге и его влияние на электрические характеристики конденсаторов . . . . .                                                     | 36        |
| § 8. Зависимость числа импульсов напряжения, соответствующих пробое и самовосстановлению металлобумажного конденсатора, от времени и напряжения . . . . . | 39        |
| <b>Глава вторая. Материалы, применяемые в производстве металлобумажных конденсаторов . . . . .</b>                                                        | <b>46</b> |
| § 9. Конденсаторная бумага . . . . .                                                                                                                      | —         |
| § 10. Лаковые покрытия бумаги . . . . .                                                                                                                   | 50        |
| § 11. Пропитывающие составы . . . . .                                                                                                                     | 54        |
| <b>Глава третья. Конструкция металлобумажных конденсаторов . . . . .</b>                                                                                  | <b>59</b> |
| § 12. Особенности конструкции металлобумажных конденсаторов . . . . .                                                                                     | —         |
| § 13. Конструкция секции . . . . .                                                                                                                        | —         |
| § 14. Конструкция пакета и корпуса . . . . .                                                                                                              | 62        |
| § 15. Изоляторы металлобумажных конденсаторов . . . . .                                                                                                   | 65        |
| <b>Глава четвертая. Технология производства металлобумажных конденсаторов . . . . .</b>                                                                   | <b>71</b> |
| § 16. Схема технологического процесса изготовления металлобумажных конденсаторов . . . . .                                                                | —         |
| § 17. Приготовление лака . . . . .                                                                                                                        | 72        |
| § 18. Лакирование бумаги . . . . .                                                                                                                        | 73        |
| § 19. Резка бумаги . . . . .                                                                                                                              | 75        |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 20. Сушка бумаги перед металлизацией . . . . .                                                               | 77  |
| § 21. Металлизация бумаги . . . . .                                                                            | 86  |
| § 22. Особенности металлизации алюминием . . . . .                                                             | 94  |
| § 23. Намотка конденсаторных секций . . . . .                                                                  | 97  |
| § 24. Прессовка и контактирование секций . . . . .                                                             | 102 |
| § 25. Сушка и пропитка секций . . . . .                                                                        | 107 |
| § 26. Тренировка секций металлобумажных конденса-<br>торов и контроль их электрических характеристик . . . . . | 110 |
| § 27. Сборка конденсаторов . . . . .                                                                           | 114 |
| § 28. Припайка или приварка крышек к корпусам . . . . .                                                        | 115 |
| § 29. Проверка на герметичность заделки корпусов и ка-<br>чества уплотнения . . . . .                          | 116 |
| § 30. Противокоррозийные покрытия . . . . .                                                                    | 118 |

## **Глава пятая. Современные типы металлобумажных конденса- торов . . . . .**

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 31. Конденсаторы общего применения (тип МБГ) . . . . .                                                               | —   |
| § 32. Конденсаторы для расширенного интервала рабо-<br>чих температур . . . . .                                        | 131 |
| § 33. Однослойные конденсаторы уменьшенных габари-<br>тов для облегченных условий эксплуатации (тип<br>МБГО) . . . . . | 136 |
| § 34. Малогабаритные металлобумажные конденсаторы<br>малой емкости (тип МБМ) . . . . .                                 | 139 |
| § 35. Герметизированные малогабаритные конденсаторы<br>малой емкости (тип К42У-2) . . . . .                            | 142 |
| § 36. Конденсаторы для цепей переменного тока (тип<br>МБГЧ) . . . . .                                                  | 144 |
| § 37. Металлобумажные радиоконденсаторы за рубежом . . . . .                                                           | 154 |
| § 38. Силовые металлобумажные конденсаторы . . . . .                                                                   | 160 |

## **Глава шестая. Старение металлобумажных конденсаторов . . . . .**

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 39. Общая характеристика процесса старения металло-<br>бумажных конденсаторов . . . . .                       | —   |
| § 40. Старение однослойных конденсаторов . . . . .                                                              | 170 |
| § 41. Старение многослойных конденсаторов . . . . .                                                             | 176 |
| § 42. Зависимость срока службы металлобумажных кон-<br>денсаторов от температуры и напряженности поля . . . . . | 179 |
| § 43. Зарубежные исследования старения и надежности<br>металлобумажных конденсаторов . . . . .                  | 183 |
| § 44. Изменения характеристик металлобумажных кон-<br>денсаторов в процессе хранения . . . . .                  | 193 |

## **Глава седьмая. Перспективы развития конденсаторов с тонкими обкладками, нанесенными на диэлектрик . . . . .**

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 45. Металлопленочные конденсаторы . . . . .                                                                             | —   |
| § 46. Конденсаторы с пленочным диэлектриком для ра-<br>боты при повышенных значениях частоты и темпе-<br>ратуры . . . . . | 200 |
| § 47. Металлизированные пленочные конденсаторы за<br>рубежом . . . . .                                                    | 205 |

## **Л и т е р а т у р а . . . . .**

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всего развития конденсаторостроения главное внимание уделялось совершенствованию диэлектрика конденсаторов, так как электрические и физические свойства диэлектрика определяющим образом влияют на габариты, температурный интервал работы и электрические характеристики конденсатора. Влиянию обкладок на важнейшие характеристики конденсаторов уделялось значительно меньшее внимание.

Вместе с тем анализ факторов, определяющих удельный объем конденсаторов, показывает, что в случае низких рабочих напряжений толщина обкладки играет существенную роль в общем объеме конденсатора.

Удельный объем конденсатора со спирально намотанной секцией выражается уравнением:

$$V_{\text{уд}} = 1,13 \cdot 10^7 \frac{d}{\varepsilon} (d + d_{\text{об}}) \cdot \left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right) [\text{см}^3/\text{мкф}], \quad (1)$$

где  $V_{\text{уд}}$  — удельный объем,  $\text{см}^3/\text{мкф}$ ;

$d$  — общая толщина диэлектрика,  $\text{см}$ ;

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$d_{\text{об}}$  — толщина обкладок,  $\text{см}$ ;

$\Delta b$  — ширина закраины,  $\text{см}$ ;

$b$  — ширина обкладки,  $\text{см}$ .

Уравнение (1) показывает, что наиболее существенным образом на величину объема влияет толщина диэлектрика.

Другими величинами, определяющими удельный объем конденсатора, являются: диэлектрическая проницаемость диэлектрика, толщина обкладок и отношение ширины закраины к ширине обкладки.

Толщина диэлектрика и отношение ширины закраины к ширине обкладки определяются в общем случае рабочим напряжением конденсатора, а диэлектрическая проницаемость — природой диэлектрика; толщина обкладок может изменяться в широких пределах, независимо от величины

рабочего напряжения. Это обстоятельство и определяет стремление уменьшать толщину обкладки до возможно меньших значений.

Современная технология проката обеспечивает получение алюминиевой и свинцово-оловянной фольги толщиной 7 мк и в специальных случаях 5 мк; такая фольга преимущественно и применяется при намотке бумажных и пленочных конденсаторов.

При изготовлении конденсаторов для относительно высоких рабочих напряжений, когда общая толщина диэлектрика  $d$  велика по сравнению с толщиной обкладки  $d_{об}$ , уменьшение толщины последней не оказывает существенного влияния на объем конденсатора.

Однако в конденсаторах с низким рабочим напряжением толщина обкладки становится сравнимой с толщиной диэлектрика и в этом случае уже существенно влияет на габариты конденсатора.

В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость удельного объема малогабаритного бумажного конденсатора, предназначенного для работы в схемах с полупроводниковыми приборами, от толщины обкладки. Рассматриваемый конденсатор предназначен для работы при напряжении до 150 в, и толщина диэлектрика в нем равна 8 мк.

Как видно из этого примера, уменьшение толщины обкладки от 10 мк до величины менее 1 мк позволяет уменьшить удельный объем конденсатора более чем в два раза.

Однако возможности уменьшения удельного объема конденсаторов при уменьшении толщины обкладок не исчерпываются простым геометрическим эффектом.

При уменьшении толщины обкладки может быть достигнуто такое ее значение, при котором пробой или короткое замыкание по проводящему включению в диэлектрике не приводят к длительному нарушению работы конденсатора. Вследствие малой толщины слоя металла, обкладка вокруг места короткого замыкания, нагреваемая током, проходящим через проводящее включение или через место пробоя, оплавляється, причем дефектное место оказывается

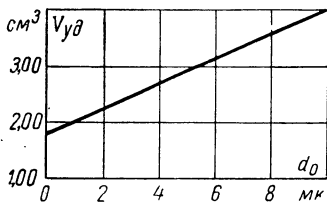


Рис. 1. Зависимость удельного объема конденсаторов с бумажным диэлектриком от толщины обкладок при толщине диэлектрика 8 мк.

изолированным от обкладки, т. е. конденсатор с такими тонкими обкладками приобретает свойство «самовосстановления» после пробоя. Это обстоятельство позволяет повысить значение рабочей напряженности поля в диэлектрике или, что то же самое, уменьшить толщину диэлектрика при заданном рабочем напряжении, по сравнению с толщиной диэлектрика в конденсаторе с относительно толстыми обкладками.

Как видно из уравнения (1), уменьшение толщины диэлектрика, при прочих равных условиях, очень существенно влияет на удельный объем конденсатора, так как, в первом приближении, величина  $V_{уд}$  пропорциональна квадрату толщины диэлектрика.

Таким образом, рационально выбранная толщина обкладок может обеспечить весьма существенное уменьшение габаритов и веса конденсаторов и сообщить им новое, ценное качество — свойство «самовосстановления» при случайных единичных пробоях. Однако минимальная возможная толщина фольговых обкладок, полученных методом проката, не обеспечивает еще свойства «самовосстановления» конденсаторов при пробое, а дальнейшее уменьшение толщины фольги сопряжено со значительными технологическими трудностями. Впрочем, если бы даже эти трудности были преодолены, то еще более тонкая фольга едва ли могла бы быть применена для машинной намотки конденсаторных секций из-за ее малой механической прочности.

Вследствие этого возникла идея непосредственного нанесения слоя металла нужной толщины на диэлектрик. Надо указать, что идея металлизации диэлектрика не нова. В начале этого столетия, когда единственным материалом, пригодным для изготовления обкладок бумажных конденсаторов, была очень дорогая в то время оловянная фольга, Мансбриджем был изобретен способ изготовления конденсаторов из металлизированной бумаги. Металлизация бумаги по этому способу производилась путем пропускания ее через ванну с полужидким клеящим составом, в котором содержался тонкий порошок олова. После просушки и каландрирования на бумаге получалась пленка толщиной порядка 2,5 мк, содержащая значительное количество олова; электропроводность этой пленки составляла 25—30% электропроводности чистого олова такой же толщины.

Бумага, металлизированная по способу Мансбриджа, применялась в течение ряда лет в конденсаторостроении. Вследствие несовершенства технологии металлизации, такая бумага не могла использоваться в конденсаторах с однослойным диэлектриком из-за низкого сопротивления изоляции. Обычно между двумя металлизированными бумагами прокладывались дополнительно один или несколько слоев неметаллизированной бумаги. Изготовленные таким образом конденсаторы обнаруживали эффект самовосстановления изоляции при пробое, что являлось их преимуществом по сравнению с конденсаторами с фольговыми обкладками. С развитием производства дешевой и тонкой алюминиевой фольги применение бумаги, металлизированной по способу Мансбриджа, в конденсаторостроении прекратилось.

В 30-х годах этого столетия германская фирма «Бош» разработала принципиально новую технологию металлизации бумаги, в основе которой лежит конденсация в вакууме паров металла на поверхности диэлектрика. Для осуществления этого процесса были построены производственные машины, позволяющие вести непрерывную металлизацию длинной ленты диэлектрика, перематываемой с рулона.

Толщину металлического покрытия при таком методе металлизации можно изменять в широких пределах — от нескольких десятых до нескольких сотых долей микрона. Столь малая толщина обкладки позволяет пренебречь в уравнении (1) величиной  $d_{об}$  по сравнению с  $d$ , вследствие чего уравнение (1) для конденсаторов с металлизированными обкладками принимает вид:

$$V_{уд} = 1,13 \cdot 10^7 \frac{d^2}{\varepsilon} \cdot \left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right) [см^3/мкф]. \quad (2)$$

Сопоставление этого уравнения с уравнением (1) показывает, что уменьшение толщины обкладки до величины, которой практически можно пренебречь, ведет к относительно тем большему снижению объема, чем меньше толщина диэлектрика.

Уравнению (2) можно придать вид:

$$V_{уд} = 1,13 \cdot 10^7 \cdot \frac{U_{раб}^2}{\varepsilon E_{раб}^2} \left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right) [см^3/мкф], \quad (3)$$

учитывая, что толщина диэлектрика

$$d = \frac{U_{\text{раб}}}{E_{\text{раб}}},$$

где  $U_{\text{раб}}$  — рабочее напряжение, в;  
 $E_{\text{раб}}$  — рабочая напряженность электрического поля, в/см.

Правильно осуществленная металлизация диэлектрика и изготовление из него конденсаторных секций, обладающих свойством самовосстановления после пробоя, позволяют значительно повышать рабочую напряженность поля в диэлектрике конденсатора с металлизированными обкладками по сравнению с конденсатором, в котором обкладки изготовлены из фольги. Как показывает уравнение (3), это ведет к дополнительному резкому уменьшению удельного объема конденсатора.

Для изоляционных материалов, применяемых в конденсаторостроении, существует предельная наименьшая толщина, определяемая современным уровнем технологии изготовления материала или особенностями его структуры. Так, например, наименьшая толщина современной конденсаторной бумаги составляет 4—5 мк, пленочных материалов 5—10 мк и т. д.

Соответственно этому при понижении рабочего напряжения величина  $d$  в уравнении (2) не может уменьшаться беспредельно. Ее наименьшее значение определяется минимальной возможной толщиной данного диэлектрика  $d_{\text{мин}}$ , и минимальное значение удельного объема конденсатора с данным диэлектриком вычисляется по уравнению:

$$(V_{\text{уд}})_{\text{мин}} = 1,13 \cdot 10^7 \frac{d_{\text{мин}}^2}{\epsilon} \left( 1 + \frac{2\Delta b}{b} \right) [\text{см}^3/\text{мкф}]. \quad (4)$$

При изготовлении конденсаторов с фольговыми обкладками, из-за наличия в диэлектрике проводящих включений и сквозных отверстий для изоляции, между обкладками обычно применяют не менее двух слоев диэлектрика.

Конденсатор с металлизированным диэлектриком на низкие рабочие напряжения благодаря эффекту самовосстановления допускает применение между обкладками одного слоя диэлектрика. Таким образом,  $d_{\text{мин}}$  у конденсатора с металлизированными обкладками в два раза меньше, чем у конденсатора с фольговыми обкладками. Только это

одно обстоятельство позволяет получить для металлобумажных конденсаторов при низких рабочих напряжениях в четыре раза меньший удельный объем. Если же учесть одновременное влияние резкого снижения толщины обкладок, то удельный объем таких конденсаторов, в сравнении с обычными бумажными, можно уменьшить в 6—7 раз.

Рассмотренные выше преимущества конденсаторов с металлизированными обкладками привели к разработке технологии их массового производства и созданию многочисленных конструкций металлобумажных и в последние годы металлопленочных конденсаторов, а также к непрерывно возрастающему их применению в радиотехнической и электронной аппаратуре. Существенную роль в расширении использования конденсаторов с металлизированными обкладками сыграло развитие техники полупроводниковых приборов, выдвигающее на первое место требование уменьшения габаритов конденсаторов постоянной емкости при одновременном снижении их рабочих напряжений.

В последующих главах излагаются физические основы конструирования и технологии производства металлобумажных конденсаторов, дается описание их конструкций и методов производства; рассматриваются также электрические характеристики этих конденсаторов и их изменение при длительном хранении и эксплуатации.

---

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛОБУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

### § 1. Тонкие металлические слои на диэлектриках

Выбор металла и технологического процесса металлизации бумаги является одним из основных вопросов производства металлобумажных конденсаторов. Наиболее удобным с производственной точки зрения является непрерывное нанесение на поверхность бумажной ленты, перематываемой с рулона, сплошного однородного металлического слоя заданной толщины. Разработка такого процесса стала возможной в результате исследований условий конденсации тонких металлических слоев на диэлектрических подложках и изучения физических свойств таких слоев.

Работы М. Кнудсена и Р. В. Вуда, а также советских физиков Ю. Б. Харитона и Н. Н. Семенова показали, что при попадании пучка атомов металла на поверхность диэлектрика, осаждение металла на этой поверхности может начаться, если температура поверхности  $T$  меньше некоторой критической величины  $T_k$ . Если  $T > T_k$ , осаждение не имеет места и поверхность диэлектрика остается совершенно чистой.

И. Лангмюр и независимо от него Я. И. Френкель развили систему представлений о механизме осаждения тонких металлических слоев на поверхности диэлектрика.

Согласно теории Я. И. Френкеля, падающие на поверхность диэлектрика атомы металла закрепляются на ней, отдают частицам диэлектрика избыточную кинематическую энергию и принимают участие в тепловом движении частиц диэлектрика. Поскольку связь атома металла с частицами диэлектрика менее прочна, чем связь между

частицами диэлектрика, вероятность отрыва атома металла от поверхности больше, чем вероятность отрыва частицы диэлектрика. Вследствие этого через некоторое время атомы металла вылетают с поверхности диэлектрика со скоростями, распределенными по закону Максвелла.

Среднее время закрепления атома металла на поверхности диэлектрика зависит от температуры диэлектрика и сродства атома металла к диэлектрику. Если поверхность диэлектрика бомбардируется недостаточно интенсивно (в смысле числа атомов, попадающих в единицу времени на поверхность диэлектрика) или среднее время закрепления атома металла мало, то на поверхности диэлектрика образуется относительно рыхлый мономолекулярный слой металла, толщина которого не изменяется со временем.

Если, напротив, число падающих на поверхность диэлектрика атомов металла или среднее время закрепления велики, то не возникает стационарного состояния. Число адсорбированных атомов металла возрастает до такого значения, что становится возможным наращивание второго слоя. К этому моменту процесс осаждения металла сильно ускоряется, так как новые атомы металла, попадающие на поверхность, связываются уже не с частицами диэлектрика, а с покрывающими его атомами металла. Поскольку силы сцепления между атомами металла значительно больше, чем силы сродства между атомами металла и диэлектрика, скорость сублимации из второго слоя атомов металла значительно меньше, чем из первого. При постоянном подводе атомов металла становится возможным быстрое наращивание толщины металлического слоя на поверхности диэлектрика.

Таким образом, каждому значению плотности пучка паров металла соответствует некоторая «критическая» температура поверхности диэлектрика, ниже которой среднее время закрепления достаточно велико, для того чтобы стало возможным наращивание полимолекулярного слоя атомов металла. При температуре  $T > T_k$  на поверхности диэлектрика возникает равновесный мономолекулярный слой атомов металла, который после прекращения бомбардировки поверхности быстро испаряется и исчезает.

Изложенные представления приводят к выводу, что условия образования на поверхности диэлектрика прочного металлического покрытия определяются плотностью

пучка паров металла, попадающего на поверхность, физическими свойствами металла и поверхности (средством) и температурой поверхности.

Последующие экспериментальные исследования подтвердили правильность теоретических представлений Я. И. Френкеля и выяснили ряд особенностей структуры и физических свойств тонких металлических слоев.

Эти исследования показали, что атомы металла, закрепляясь на диэлектрической подложке и участвуя в тепловом движе-

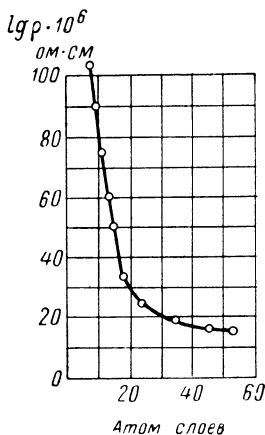


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления слоя никеля от его толщины.

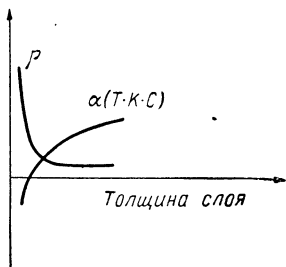


Рис. 3. Общий характер зависимости удельного сопротивления и температурного коэффициента металла от толщины слоя.

нии частиц диэлектрика, способны мигрировать на поверхности, соударяясь с другими атомами металла. Такое соударение может привести к образованию двойников и тройников, с которых и начинается процесс построения слоя металла. В начальной стадии этого процесса отдельные атомы металла на поверхности диэлектрика разобщены и сопротивление слоя бесконечно велико. Однако благодаря миграции происходит группировка атомов в некоторые центры, образуются скопления частиц. С течением времени конденсации эти центры увеличиваются и между ними появляются контактные мостики. По достижении определенной толщины удельное сопротивление слоя начинает быстро падать. На рис. 2 показана зависимость удельного сопротивления слоя никеля от толщины.

Следует указать, что помимо своеобразной зависимости удельного сопротивления от толщины слоя, для тонких металлических слоев наблюдается также аномальная зависимость температурного коэффициента сопротивления от толщины слоя. Общий ход зависимости удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления от толщины слоя представлены на рис. 3. Для большинства исследованных металлов величина удельного сопротивления становится постоянной при толщинах порядка 0,01—0,02 мк; аномальные значения температурного коэффициента удельного сопротивления наблюдаются иногда и в слоях большей толщины.

## § 2. Выбор металла и метода металлизации диэлектрика при изготовлении конденсаторов

Как видно из предыдущего, осаждение на диэлектрике металлического слоя успешно осуществляется в том случае, когда на поверхность диэлектрика падает пучок атомов металла достаточно высокой плотности. Поскольку промышленная металлизация конденсаторного диэлектрика должна обеспечивать высокую производительность, необходимо создать условия, при которых на поверхности ленты диэлектрика, перематываемой с рулона, в течение всего времени перематки поддерживалась бы постоянная и достаточно высокая плотность пучка атомов металла или достаточно высокое давление паров металла.

Давление насыщенных паров большинства исследованных металлов, по данным Эджертона, зависит от температуры по следующему закону:

$$\lg p = -\frac{A}{T} + C, \quad (5)$$

где  $p$  — давление, мм рт. ст.;  
 $T$  — абсолютная температура, °K;  
 $A$ ,  $C$  — константы.

Для быстрой ориентировки и грубых подсчетов можно пользоваться таблицей температур, соответствующих различным порядкам давления паров, составленной Дичборном и Джельмором (табл. 1).

Учитывая, что металлизации должны подвергаться органические диэлектрики, отличающиеся малой теплостойкостью, следует отдать предпочтение тем металлам, упругость паров которых достигает высокого значения при

**Зависимость между давлением насыщенных паров  
металлов и температурой**

| Наименование<br>металлов | Температура в °К, при которой давление паров<br>металла в мм рт. ст. достигает указанных здесь<br>значений: |           |           |        |        |        |      |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|--------|--------|--------|------|
|                          | $10^{-4}$                                                                                                   | $10^{-2}$ | $10^{-1}$ | $10^0$ | $10^1$ | $10^2$ | 760  |
| Медь . . . . .           | —                                                                                                           | —         | 1460      | 1660   | 1920   | 2270   | 2700 |
| Серебро . . . . .        | —                                                                                                           | 1180      | 1310      | 1460   | 1660   | 1920   | 2230 |
| Олово . . . . .          | —                                                                                                           | 1148      | —         | —      | —      | —      | —    |
| Цинк . . . . .           | 523                                                                                                         | 619       | 681       | 762    | 867    | 1007   | 1179 |
| Кадмий . . . . .         | 456                                                                                                         | 539       | 594       | 666    | 760    | 886    | 1039 |
| Алюминий . . . . .       | —                                                                                                           | 1470      | 1610      | 1780   | 1980   | 2240   | 2530 |
| Висмут . . . . .         | —                                                                                                           | 970       | 1070      | 1190   | 1340   | 1530   | 1750 |
| Хром . . . . .           | —                                                                                                           | 1190      | 1330      | 1550   | 1850   | 2300   | —    |

относительно низких температурах. Как видно из табл. 1, к числу таких металлов относятся цинк и кадмий.

Однако надо иметь в виду, что металлы с низкой температурой кипения будут иметь и более низкую критическую температуру, а потому могут хорошо конденсироваться лишь при низкой температуре поверхности диэлектрика (подложки). Это затруднение, как показал Цехендер, может быть устранено, если на подложку из лаковой пленки предварительно нанести тончайший слой металла с высокой температурой кипения, например, олова или серебра. В этом случае при осаждении легкокипящих металлов они значительно легче закрепляются на подложке благодаря связи с атомами ранее нанесенного тугокипящего металла, и наращивание слоя может происходить при более высоком значении температуры подложки. В практике металлизации конденсаторной бумаги легкокипящим металлом — цинком по этой причине применяют тончайший подслой из олова или серебра.

Однако при выборе металла для обкладок конденсатора, помимо факторов, определяющих условия нанесения металлического слоя на диэлектрик (упругость паров, температура кипения), существенную роль играют еще физические свойства металла. В этой связи весьма важны химическая стабильность металла и электрические свойства его окислов. Цинк, который благодаря высокой упругости

паров и низкой температуре кипения, получил широкое распространение в технике металлизации конденсаторных диэлектриков, имеет следующие недостатки:

1) Тонкая цинковая обкладка на конденсаторном диэлектрике в атмосфере повышенной влажности легко окисляется, увеличивая свое сопротивление, вследствие чего металлизированный диэлектрик в производстве конденсаторов допускает только кратковременное хранение в комнатных условиях и требует соблюдения специальных мер предосторожности (осушаемые шкафы) при длительном хранении.

2) Окислы цинка имеют полупроводящие свойства, а потому частицы этих окислов, попавшие на изолированный участок, образующийся вокруг места пробоя (или другого повреждения диэлектрика) в процессе самовосстановления конденсатора, создают на этом участке пути утечки, снижающие сопротивление изоляции. Чисто металлические мостики, которые также могут создаваться на изолированном участке, по-видимому, менее опасны, поскольку их легче удалить при последующих импульсах тренировки.

Оба эти недостатка побуждают искать другой более подходящий металл для нанесения обкладок на конденсаторные диэлектрики. Свободным от указанных недостатков оказался алюминий: благодаря наличию тонкой пленки окиси на поверхности этого металла, он не поддается коррозии в условиях влажности, а окисел его отличается высокими диэлектрическими свойствами. В связи с этим, алюминий, несмотря на относительно высокую температуру кипения, получает наряду с цинком широкое распространение для металлизации конденсаторных диэлектриков.

Изложенные выше результаты исследований позволяют выбрать основные принципы технологии металлизации конденсаторных диэлектриков.

В качестве источника пучка атомов металла могут быть использованы плоские или точечные испарители, расположенные под перематывающейся с рулона лентой диэлектрика. Испарение металла должно производиться в вакууме, при малом остаточном давлении, величина которого может быть оценена из следующих соображений. Если на пути между испарителем и поверхностью конденсации атомы металла не сталкиваются с молекулами воздуха, то распространение пучка атомов металла подчиняется законам геометрической оптики. Такие условия металлизации

надо признать оптимальными, так как они позволяют рассчитать положение испарителей, обеспечивающее однородное покрытие металлом ленты диэлектрика, и исключают рассеяние и окисление металла на пути между испарителем и металлизированной поверхностью.

Средняя длина пробега частицы, согласно кинетической теории газов, определяется соотношением:

$$l = \frac{1}{\sqrt{2}\pi N \delta^2}, \quad (6)$$

где  $N$  — число молекул в  $1 \text{ см}^3$ ;

$\delta$  — диаметр молекул.

Принимая  $\delta = 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$  и имея в виду, что при нормальных условиях ( $0^\circ \text{ С}$  и  $760 \text{ мм рт. ст.}$ )  $N = 2,7 \cdot 10^{19}$  и меняется с изменением давления пропорционально последнему, можно вычислить среднюю длину свободного пробега при любых значениях давления. Так, например, если расстояние между испарителем и лентой диэлектрика составляет  $5 \text{ см}$ , то давление, при котором будет осуществляться распространение пучка атомов металла без рассеяния, окажется равным  $5 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$  Создание такого глубокого вакуума в промышленных установках сопряжено с известными трудностями. Как показывает опыт, при металлизации цинком получение хорошего слоя обеспечивается при давлениях  $5\text{—}10 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ , хотя при этом имеет место некоторое рассеяние пучка атомов металла и конденсация на стенках прибора. При металлизации алюминием слой хорошего качества получается при давлениях не выше  $1 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$  Это обстоятельство усложняет устройство машин для металлизации этим металлом. Однако упомянутые выше преимущества алюминия компенсируют усложнение технологии металлизации, вследствие чего металлизация диэлектриков алюминием находит расширяющееся применение в конденсаторостроении.

### **§ 3. Механизм самовосстановления изоляции конденсаторов при пробое или коротком замыкании по проводящему включению**

Прежде чем рассмотреть механизм самовосстановления изоляции при пробое и коротком замыкании обкладок металлобумажного конденсатора, следует установить методы оценки толщины обкладки, так как эта толщина оказывает

существенное влияние на ход процесса восстановления изоляции. Непосредственное измерение толщины металлического слоя, осажденного на диэлектрик, ввиду малой толщины этого слоя, представляет значительные трудности. Косвенно о толщине слоя можно судить по величине сопротивления участка обкладки, пользуясь соотношением

$$r = \varrho \frac{L}{S}, \quad (7)$$

где  $r$  — сопротивление участка металлизированной поверхности диэлектрика;

$\varrho$  — удельное сопротивление металла обкладки;

$L$  — длина участка металлизированного диэлектрика;

$S$  — площадь поперечного сечения металла на участке металлизированного диэлектрика, равная

$$S = b\delta, \quad (8)$$

здесь  $b$  — ширина участка металлизированного диэлектрика;

$\delta$  — толщина металлического слоя.

Таким образом, пользуясь уравнением (7), можно по величине  $r$  вычислить толщину слоя  $\delta$ , если известно удельное сопротивление металла  $\varrho$ .

Толщина металлических слоев, применяемых в производстве металлобумажных конденсаторов, обычно составляет несколько сотых долей микрона и лежит выше границы, до которой удельное сопротивление металлического слоя существенно зависит от его толщины (см. рис. 2). Вследствие этого можно было бы при вычислении толщины слоя считать, что удельное сопротивление металла в тонком слое равно удельному сопротивлению этого металла в сплошном куске. Однако такой расчет может дать лишь приближенное значение толщины слоя, так как даже при толщинах порядка  $0,1 \text{ мк}$  удельное сопротивление для тонкого слоя может значительно отличаться от удельного сопротивления для сплошного куска металла, в зависимости от плотности полученного слоя.

В производственных условиях для оценки толщины слоя и при ее контроле часто пользуются величиной сопротивления квадратного участка обкладки, которое выражается соотношением:

$$r_s = \frac{\varrho}{\delta}. \quad (9)$$

Поскольку на характеристики металлобумажного конденсатора существенное влияние оказывает не столько толщина обкладки, сколько величина электропроводности последней, то в современной промышленной практике толщину металлического слоя в обкладке конденсатора характеризуют величиной  $r_S$ , выраженной в  $\text{ом}$ , или обратной величиной  $\gamma_S$ , выраженной в  $\text{ом}^{-1}$ .

Для металлобумажных конденсаторов при металлизации цинком величина  $\gamma_S$  обычно лежит в пределах от 0,2 до 1,5  $\text{ом}^{-1}$ . Если принять для цинка  $\rho = 6 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$ , то для толщины металлического слоя получим приближенные значения от 0,01 до 0,09  $\text{мк}$ .

Определение оптимальной толщины металлизированной обкладки металлобумажного конденсатора должно основываться на определенных представлениях о механизме процесса самовосстановления при пробое или при замыкании обкладок проводящим включением в диэлектрике.

Как показали исследования П. А. Торошина, процесс восстановления развивается следующим образом. При постоянной толщине металлического покрытия плотность тока, притекающего по обкладке к месту короткого замыкания, обратно пропорциональна расстоянию от точки, в которой произошло короткое замыкание. Поэтому в непосредственной близости от места короткого замыкания металл разогревается, причем внутри окружности малого радиуса  $r$ , вокруг места короткого замыкания, температура металла поднимается до точки плавления. Расплавление металла создает условия для возникновения между обкладками электрической дуги, которая разбрасывает расплавленный металл, создавая вокруг места короткого замыкания участок поверхности, свободный от металлического покрытия. При увеличении радиуса этого изолированного участка дуга удлиняется и гаснет. На этом процесс самовосстановления изоляции заканчивается.

Для того чтобы этот процесс прошел эффективно и участок, с которого был удален металл, получил достаточно высокое сопротивление изоляции, необходимо чтобы в зоне разряда выделилась определенная энергия. Однако если энергия разряда слишком велика, то наряду с изолированием участка вокруг места короткого замыкания может произойти и разрушение диэлектрика. На рис. 4 приведены фотографии участков обкладки, на которых произошло самовосстановление изоляции: без разрушения диэлектрика

(при малой мощности разряда) и с разрушением диэлектрика (при большой мощности разряда). Для разряда большой мощности характерно образование ветвистых побегов, образующих зону, в которой диэлектрик поврежден. Очевидно, что мощный разряд, приводящий к раз-

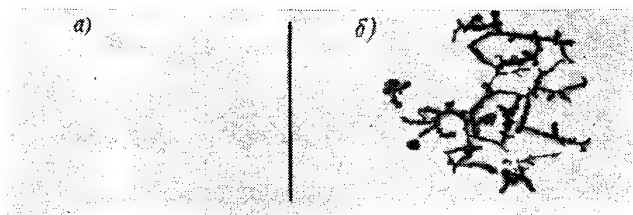


Рис. 4. Металлизированная бумага с участками разрушенного металла: *а*—без разрушения диэлектрика; *б*—с разрушением диэлектрика.

рушению диэлектрика (рис. 4, *б*), подготавливает условия для образования нового пробоя. Толщина обкладки должна быть такой, чтобы разряд при восстановлении изоляции давал картину, изображенную на рис. 4, *а*.

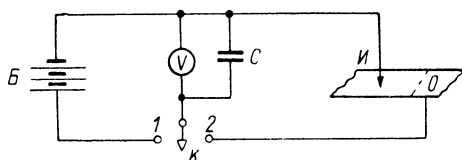


Рис. 5. Схема установки для измерения энергии разрушения обкладки вблизи от острия иглы:

*Б* — источник постоянного напряжения; *К* — переключатель; *С* — конденсатор; *V* — вольтметр; *И* — игла; *О* — образец металлизированной бумаги, покрытой сверху слоем обычной конденсаторной бумаги.

П. А. Торошиным было произведено измерение энергии разряда в зависимости от толщины металлической обкладки на диэлектрике. Опыты производились по схеме, показанной на рис. 5.

При замыкании переключателя в положение *1* конденсатор *С* заряжается до напряжения  $U_1$ , отмечаемого вольтметром; при переводе ключа в положение *2* конденсатор присоединяется к образцу металлизированной бумаги.

Если при этом проколоть иглой *И* конденсаторную бумагу, покрывающую металлизированную поверхность диэлектрика, то вокруг иглы, имитирующей в данном случае дефектное место в изоляции конденсатора, возникает разряд, создающий изолированную зону.

Энергия, израсходованная на восстановление изоляции, может быть определена по понижению напряжения на конденсаторе *C*. Если к моменту завершения разряда напряжение на конденсаторе стало равным  $U_2$ , то энергия, израсходованная на восстановление изоляции, равна

$$W = C \frac{(U_1^2 - U_2^2)}{2}. \quad (10)$$

Измерения энергии разряда при восстановлении изоляции на образцах бумаги, металлизированной цинком, с различной толщиной обкладки привели к установлению зависимости энергии разряда от толщины обкладки, представленной на рис. 6. Эта зависимость показывает, что энергия разряда быстро убывает с уменьшением толщины обкладки, причем при малых толщинах обкладки диэлектрик вблизи места разряда не разрушается и зона изолирования соответствует рис. 4, а.

Нагружая образец металлизированной бумаги грузом определенного веса, можно было проследить зависимость энергии разряда от давления в зоне разряда при постоянной толщине обкладки. Эта зависимость изображена на рис. 7.

Резкое уменьшение энергии разряда с повышением давления в зоне разряда может быть объяснено тем, что возникающая в момент разряда дуга быстро гаснет при повышенном давлении газов в зоне разряда, обеспечивая восстановление изоляции при малом радиусе зоны изолирования и малом расходе энергии.

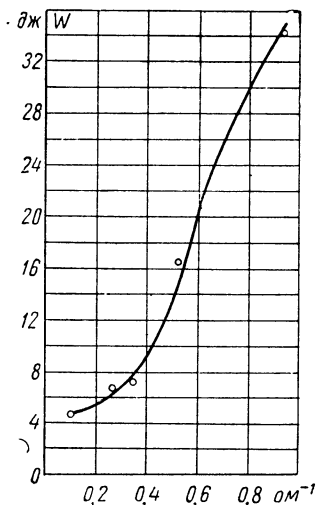


Рис. 6. Зависимость энергии разрушения обкладки от ее толщины, характеризуемой величиной электропроводности (Торошин).

Это обстоятельство определяет известные требования к пропитываемому материалу и конструкции секции металлобумажного конденсатора. Секция должна быть построена так, чтобы повышенное давление, возникающее в зоне разряда, не могло быстро выравняться. Это обычно достигается применением в качестве пропитывающего состава воскообразного вещества, обладающего в интервале

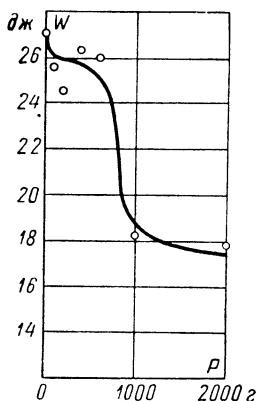


Рис. 7. Зависимость энергии, необходимой для самовосстановления изоляции образца от давления на образец (Торошин).

рабочих температур достаточно высокой вязкостью. В таких секциях небольшие полости, возникающие в зоне разряда, оказываются хорошо уплотненными, вследствие чего возрастающее в них при разряде давление газов быстро гасит дугу, не давая разряду развиваться и повредить диэлектрик.

В опытах П. А. Торошина со схемой рис. 5 были определены также влияние величины емкости конденсатора и напряжения, до которого он заряжается, на энергию и характер разряда при самовосстановлении изоляции. На рис. 8 приведено изменение площади разрушения обкладки при различных напряжениях, в зависимости от емкости конденсатора. Из приведенных на рисунке кривых видно,

что увеличение емкости примерно до 10 мкф приводит к увеличению разрушенной площади обкладки. Дальнейшее увеличение емкости конденсатора не изменяет условия пробоя. Повышение напряжения от 200 до 600 в приводит к непрерывному росту разрушаемой площади обкладки.

Результаты этих опытов могут служить основанием для рационального выбора режима технологической тренировки секций металлобумажных конденсаторов с однослойной изоляцией.

Опыты по пробую образцов металлизированной бумаги, на поверхности которых были проведены продольные риски, где часть металлического слоя была удалена и сопротивление увеличено, показали, что разрушение обкладок происходит не за счет энергии, выделяющейся

в виде тепла в канале пробоя, а за счет нагревания обкладок проходящим по ним током.

На рис. 9 показан образец металлизированной бумаги с участками, которые разрушились вблизи от острия иглы (а), и участками, расположенными вдали от острия иглы, но также разрушенными (б), так как в этих участках, соответствующих упомянутым выше рискам, толщина металлического слоя была снижена, что обусловило локальное повышение плотности тока.

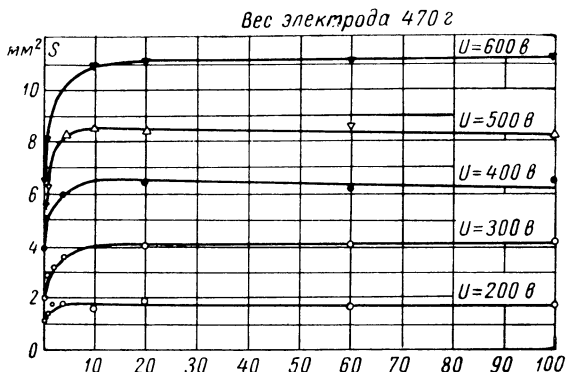


Рис. 8. Зависимость разрушенной площади обкладки от емкости конденсатора при различных напряжениях (по оси абсцисс — емкость в мкф) (Торошин).

Изложенные выше результаты исследования зависимости энергии разряда от толщины обкладки приводят к выводу о целесообразности применения возможно более тонких обкладок. Однако уменьшение толщины обкладок ограничивается соображениями о необходимости обеспечить достаточно длительный срок службы конденсатора и относительно низкое значение тангенса угла потерь в рабочем диапазоне частот. Эти соображения будут изложены в последующих параграфах.

Основываясь на описанном выше вероятном механизме самовосстановления изоляции, можно сделать некоторые выводы относительно необходимых физических свойств металла, выбираемого для обкладок.

Для того чтобы произошло самовосстановление изоляции, необходимо нагреть слой металла вокруг проводящего включения или места пробоя до температуры плавления металла и расплавить его. Если радиус включения

(или отверстия, по которому происходит пробой) обозначить через  $r_1$ , а радиус окружности в пределах которой поверхность диэлектрика должна очиститься от металла для восстановления изоляции, через  $r_2$ , то масса металла, подлежащая расплавлению, выразится как

$$m = \rho v = \rho (r_2^2 - r_1^2) \delta \tau, \quad (11)$$

где  $\rho$  — плотность металлического слоя;  
 $\delta$  — толщина слоя.

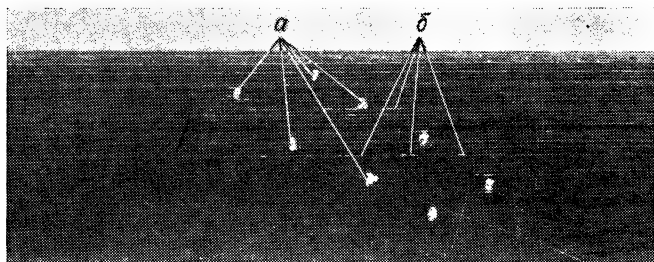


Рис. 9. Металлизированная бумага, имеющая продольные риски, с участками разрушенного металла:  $a$  — разрушения у острия иглы;  $b$  — разрушения на рисках.

Количество энергии, необходимой для расплавления такой массы металла,

$$Q = m [c (t_{\text{пл}} - t_0) + L], \quad (12)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость металла;  
 $t_{\text{пл}}$  — температура плавления металла;  
 $t_0$  — начальная температура металла;  
 $L$  — скрытая теплота плавления металла.

Подставляя в уравнение (12) значение  $m$ , получим:

$$Q = \rho \pi \delta (r_2^2 - r_1^2) [c (t_{\text{пл}} - t_0) + L]. \quad (13)$$

Если исходить из того, что при разряде должен быть расплавлен металл на участке радиуса  $r_2$  при возможно меньшем количестве энергии, выделяющейся в зоне разряда, то следует отдать предпочтение металлам, расплавляющимся при меньшем расходе энергии.

Энергия  $Q$ , расходуемая на расплавление металла в кольце шириной  $(r_2 - r_1)$  вокруг места короткого за-

мыкания, складывается из энергии  $q_1$ , выделяемой током короткого замыкания и поступающей от источника напряжения, и энергии  $q_2$ , выделяющейся при частичном окислении металла обкладки

$$Q = q_1 + q_2. \quad (14)$$

Второе слагаемое  $q_2$  в этом уравнении не поддается определению, так как неизвестно, какая часть металла при разряде окисляется.

В табл. 2 приведены данные для некоторых металлов, характеризующие их по расходу энергии на плавление обкладок с проводимостью  $0,3 \text{ ом}^{-1}$  на площади  $1 \text{ см}^2$ . Табл. 2 показывает, что значение электропроводности  $0,3 \text{ ом}^{-1}$  при обкладке из серебра достигается при толщине  $0,0078 \text{ мк}$ , из алюминия — при толщине  $0,0081 \text{ мк}$ , из цинка — при толщине  $0,0187 \text{ мк}$ , а из висмута — при толщине  $0,360 \text{ мк}$ .

При расплавлении обкладок, изготовленных из разных металлов, но имеющих одинаковую электропроводность, меньше всего требуется энергии для серебряной обкладки, на

Таблица 2  
Толщина обкладок, изготовленных из различных металлов с электропроводностью  $0,3 \text{ ом}^{-1}$ , и количество энергии, необходимое для их плавления

| Наименование металла | Температура плавления, °С | Теплоемкость, $\text{кал/град}^\circ\text{С}$ | Скрытая теплота плавления, $\text{кал/г}$ | Удельная электропроводность $\text{ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ | Толщина слоя при электропроводности $0,3 \text{ ом}^{-1}$ | Удельный вес, $\text{г/см}^3$ | Вес металла на площадь $1 \text{ см}^2$ | Количество энергии, необходимой для плавления обкладки на площади $1 \text{ см}^2$ |                         |                     |
|----------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
|                      |                           |                                               |                                           |                                                                 |                                                           |                               |                                         | нагревание, $\text{кал}$                                                           | плавление, $\text{кал}$ | всего, $\text{кал}$ |
| Алюминий             | 660                       | 0,217                                         | 86,4                                      | $37 \cdot 10^4$                                                 | 0,0081                                                    | 2,7                           | $2,15 \cdot 10^{-6}$                    | $3,1 \cdot 10^{-4}$                                                                | $1,9 \cdot 10^{-4}$     | $5 \cdot 10^{-4}$   |
| Висмут               | 271                       | 0,029                                         | 10,3                                      | $8,3 \cdot 10^3$                                                | 0,36                                                      | 9,8                           | $3,52 \cdot 10^{-4}$                    | $2,77 \cdot 10^{-3}$                                                               | $3,63 \cdot 10^{-3}$    | $6,4 \cdot 10^{-3}$ |
| Кадмий               | 321                       | 0,054                                         | 11,7                                      | $9,25 \cdot 10^4$                                               | 0,0345                                                    | 8,64                          | $2,81 \cdot 10^{-5}$                    | $4,9 \cdot 10^{-4}$                                                                | $3,3 \cdot 10^{-4}$     | $8,2 \cdot 10^{-4}$ |
| Серебро              | 960                       | 0,055                                         | 25,8                                      | $62,8 \cdot 10^4$                                               | 0,0048                                                    | 10,5                          | $5,04 \cdot 10^{-5}$                    | $2,7 \cdot 10^{-4}$                                                                | $1,3 \cdot 10^{-4}$     | $4 \cdot 10^{-4}$   |
| Цинк                 | 419                       | 0,091                                         | 25,3                                      | $16,0 \cdot 10^4$                                               | 0,0187                                                    | 7,14                          | $1,3 \cdot 10^{-5}$                     | $5,1 \cdot 10^{-4}$                                                                | $3,3 \cdot 10^{-4}$     | $8,2 \cdot 10^{-4}$ |
| Олово                | 232                       | 0,053                                         | 13,3                                      | $8 \cdot 10^4$                                                  | 0,0372                                                    | 7,28                          | $2,71 \cdot 10^{-5}$                    | $3,3 \cdot 10^{-4}$                                                                | $3,6 \cdot 10^{-4}$     | $6,9 \cdot 10^{-4}$ |

втором месте стоит алюминиевая обкладка, затем идет оловянная и уже после нее — кадмиевая и цинковая.

Выше были описаны некоторые опыты по пробоеобразцов металлизированной бумаги, при которых для подвода тока к образцу использовалась игла. Проводя аналогичные опыты, французский исследователь Хюро отметил существенное влияние полярности иглы на характер картины разрушения металлического слоя, происходящего вокруг ее острия.

При положительной игле наблюдаются ветвистые следы демееталлизации («дендриты»), а при отрицательной игле — компактный участок демееталлизации, по форме близкий к кругу. Вокруг места пробоя расположена зона, откуда металл удален («зона взрыва»), далее идут волны конденсированного металла и, наконец, опять лишенный металла узкий участок. Волны конденсации металла особенно хорошо заметны при отрицательной игле. Получаемые картины демееталлизации напоминают известные «картины Лихтенекера»; по-видимому, и в данном случае различие в картинах разрушения металла при положительном и отрицательном острие связано с различным движением ионов при изменении полярности.

По данным Хюро при пробое металлизированной бумаги сквозное отверстие в месте пробоя или совсем незаметно или же имеет диаметр менее 20 мк. Демееталлизированная площадь вокруг места пробоя зависит от условий опыта. Если проводить пробой бумаги за счет разряда заряженного конденсатора, то при емкости 2,5 мкф увеличение напряжения от 420 до 1000 в увеличивает площадь демееталлизации от величины порядка 0,1 мм<sup>2</sup> до 0,2 мм<sup>2</sup>; увеличение емкости от 1 до 10 мкф увеличивало среднее значение площади демееталлизации от 0,05 до 0,5 мм<sup>2</sup>. Сильное влияние оказывает ограничивающее сопротивление; если при его отсутствии площадь, с которой был удален металл, составляла около 0,25 мм<sup>2</sup>, то при ограничивающем сопротивлении 500 ом эта площадь снизилась до 0,03 мм<sup>2</sup>.

При пробое образца бумаги на воздухе при напряжении 600 в была получена площадь демееталлизации порядка 10,3 мм<sup>2</sup>, при тех же условиях опыта, но при погружении образца в масло, эта площадь снизилась до 2,5 мм<sup>2</sup>.

Для сравнения полезно указать, что по данным германских исследователей Хейванга и Прейссингера диаметр

канала пробоя может составлять в реальных металlobумажных конденсаторах от 5 до 100 мк, а диаметр участка, с которого удаляется металл, в зависимости от емкости конденсатора и величины напряжения, изменяется в пределах от 0,1 до 3 мм (площадь от 0,008 до 7 мм<sup>2</sup>), что ближе подходит к нашим данным, чем результаты, полученные Хюро.

#### **§ 4. Электрохимическое самовосстановление в конденсаторах с металлизированным диэлектриком**

В случае использования для металлизации бумаги алюминия вместо обычно применяемого цинка, кроме описанного выше механизма самовосстановления изоляции конденсатора при пробое, т. е. при воздействии относительно высокого напряжения, может происходить также и процесс самовосстановления при низком напряжении, когда пробой заведомо не имеет места, а также не может даже возникнуть электрическая дуга, играющая существенную роль в процессе деметаллизации вокруг места пробоя, как было указано выше.

Немецкими исследователями Беном, Каммермайером, Хейвангом и Прейссингером был проделан следующий опыт. Взято было несколько металlobумажных конденсаторов с алюминиевыми обкладками, еще не проходивших тренировки и имевших неизолированные дефекты диэлектрика, которые обуславливали величину сопротивления между выводами конденсатора порядка 8—800 ом. На испытуемые конденсаторы было подано напряжение 12 в постоянного тока через ограничивающее сопротивление, равное 10 ком. При этом на выводах испытуемых конденсаторов в соответствии с тем, что сопротивление их было резко понижено в сравнении с ограничивающим сопротивлением, величина напряжения была очень мала и составляла от 10 мв до 1 в; энергия, запасенная в конденсаторах, тоже была весьма мала, порядка  $10^{-10}$ — $10^{-6}$  Дж. Эти цифры показывают, что возможность пробоя конденсаторов была полностью исключена, так же как и связанного с ним механизма самовосстановления, который мы рассматривали ранее.

Тем не менее, по истечении различного времени, от нескольких часов до нескольких тысяч часов, все испытуемые образцы, за исключением одного, восстановили

высокое значение сопротивления изоляции, которое достигло величины порядка 10 000 Мом. Этот опыт подтвердил возможность самовосстановления при длительном действии малого постоянного напряжения.

Немецкие исследователи дают этому явлению следующее объяснение. Основой его является ионная природа проводимости диэлектрика в исследуемых конденсаторах, причем большая часть ионов, участвующих в прохождении тока, поставляется за счет электролитической диссоциации следов влажности. Процессы у катода, куда приходят

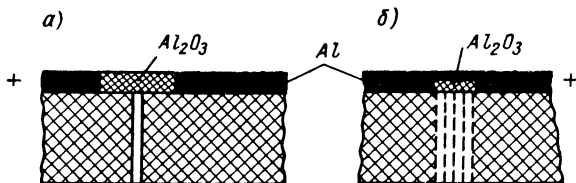


Рис. 10. Электрохимическое самовосстановление в металлобумажном конденсаторе с алюминиевыми обкладками: *а* — около сквозной поры; *б* — около участка с повышенной проводимостью, сосредоточенной в небольшом объеме (окислена только часть толщины алюминиевого слоя).

катионы  $H^+$ , не оказывают существенного влияния на механизм самовосстановления; основную роль играют процессы у анода, которым в данном случае является алюминий. По слабому месту диэлектрика в виде сквозной поры (рис. 10, *а*) или в виде участка повышенной сквозной проводимости, сосредоточенной в небольшом объеме (рис. 10, *б*), проходит увеличенный ток утечки, способствующий выделению кислорода у алюминиевой обкладки, находящейся под положительным потенциалом. При этом алюминий, соприкасающийся с участком повышенной проводимости или со стенками поры, по которым проходит ток утечки, окисляется и образует тонкий слой  $Al_2O_3$ , обладающий хорошими электроизолирующими свойствами. Это приводит к резкому снижению тока утечки и восстановлению высокого значения сопротивления изоляции конденсатора. Даже частичное окисление слоя алюминия, захватывающее лишь часть его толщины, уже может быть достаточным для существенного повышения сопротивления изоляции.

Упомянутые исследователи обнаружили на анодных обкладках изучавшихся ими образцов пятнышки в виде маленьких правильных кружков, очевидно соответствовавшие тем местам, где происходило электрохимическое самовосстановление; электронографическое исследование этих пятнышек подтвердило, что они состоят из окиси алюминия. Только один из исследованных образцов не восстановился за 1500 часов испытания. Можно предполагать, что в этом случае между обкладками конденсатора установилось прямое короткое замыкание через металлический мостик, которому свойственна не ионная, а электронная проводимость.

Процесс электрохимического самовосстановления происходит не мгновенно, а развивается во времени, обеспечивая восстановление сопротивления изоляции до некоторого высокого значения, которое далее уже сохраняется постоянным. При длительном испытании металлобумажных конденсаторов в течение года было установлено, что для конденсаторов с номинальным напряжением 160 в более 30 % из общего числа зарегистрированных случаев пробоя, сопровождавшегося восстановлением, приходится на первые 24 часа испытания. Предполагается, что снижение числа пробоев с течением времени связано с явлением электрохимического самовосстановления, «залечивающего» дефектные места в диэлектрике. Это явление особенно полезно для конденсаторов с тонкими обкладками, рассчитанными на работу при малых напряжениях, когда пробой невозможен и нормальный механизм самовосстановления не может проявиться. Можно думать, что электрохимическое самовосстановление будет проявляться и в металлопленочных конденсаторах с очень тонким диэлектриком (лакопленочные конденсаторы), в которых обкладки изготовлены из алюминия. В металлобумажных или металлопленочных конденсаторах, в которых обкладки изготовлены из цинка, это явление не должно иметь места, так как окись цинка не обладает изолирующими свойствами.

## **§ 5. Влияние толщины обкладки на электрические характеристики металлобумажного конденсатора**

В § 3 было отмечено, что уменьшение толщины обкладки обеспечивает более благоприятные условия самовосстановления изоляции металлобумажного конденсатора

при его пробое. Это обстоятельство должно проявиться при изучении влияния толщины обкладки на стабильность сопротивления изоляции металлобумажного конденсатора и его устойчивости при многократных пробоях.

На рис. 11 приведены, полученные П. А. Торощиным и В. И. Скрипкиным, зависимости относительного изменения емкости, сопротивления изоляции и тангенса угла

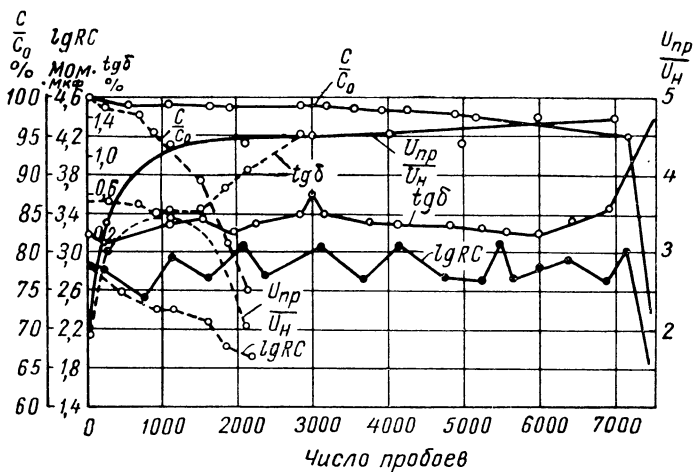


Рис. 11. Зависимость электрических характеристик металлобумажных конденсаторов от числа пробоев: Сплошные кривые соответствуют значению  $r_s = 4,16 \text{ ом}$ , пунктирные  $r_s = 0,84 \text{ ом}$  (увеличенная толщина слоя).

потерь однослойных конденсаторов с цинковыми обкладками, толщина которых характеризовалась значениями  $r_s = 4,16 \text{ ом}$  и  $r_s = 0,84 \text{ ом}$ , от числа пробоев конденсатора.

Из рисунка видно, что конденсаторы, имеющие более тонкий слой металла с  $r_s = 4,16 \text{ ом}$ , только после 7000 пробоев начали существенно изменять свои характеристики, в то время как при величине  $r_s = 0,84 \text{ ом}$  уже после 800 пробоев можно заметить резкое возрастание тангенса угла потерь и уменьшение емкости и сопротивления изоляции. На этом же рисунке нанесена зависимость пробивного напряжения от числа пробоев; при величине  $r_s = 4,16 \text{ ом}$  с увеличением числа пробоев пробивное напряжение систематически возрастало и увеличивалось после 7000 про-

боев почти в 5 раз, в то время как при  $r_S = 0,84$  ом после 1000 пробоев началось снижение пробивного напряжения.

Приведенные данные позволяют сделать вывод о целесообразности применения обкладок возможно меньшей толщины. Однако следует иметь в виду, что при уменьшении толщины обкладки возрастает ее активное сопротивление, включенное последовательно с емкостью конденсатора, что приводит к возрастанию потерь. Вследствие этого необходимо оценить влияние толщины обкладки на значение тангенса угла потерь конденсатора, в особенности при повышенных частотах.

Величину составляющей тангенса угла потерь спирально намотанного конденсатора, обусловленную потерями в обкладках, можно вычислить по приближенной формуле, предложенной М. М. Асниным и В. Т. Ренне.

Для металlobумажных конденсаторов, в которых контакт обкладок с внешними выводами осуществлен по принципу «безындукционной» намотки, эта формула имеет вид:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{обк}} = 4 \cdot 10^{-9} r_S f \frac{b \varepsilon}{d}, \quad [(15)]$$

где  $r_S$  — сопротивление образца обкладки в форме квадрата, ом;

$f$  — частота, гц;

$\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$b$  — ширина обкладки, см;

$d$  — толщина диэлектрика, мк.

Величину  $\operatorname{tg} \delta_{\text{обк}}$  можно выразить и через емкость конденсатора, в этом случае формула (15) принимает вид:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{обк}} = \frac{2}{3} \cdot 10^{-6} r_S \omega C \frac{b}{l}, \quad (16)$$

где  $\omega$  — круговая частота;

$C$  — емкость конденсатора, мкф;

$l$  — длина обкладки, см.

Уравнения (15) и (16) показывают, что  $\operatorname{tg} \delta_{\text{обк}}$  прямо пропорционален  $r_S$  и, следовательно, обратно пропорционален толщине металлической обкладки.

В табл. 3 приведены значения  $\operatorname{tg} \delta_{\text{обк}}$ , вычисленные по формуле (16), для металlobумажного конденсатора с изоляцией в один слой бумаги толщиной  $d = 10$  мк; величина диэлектрической проницаемости принята  $\varepsilon = 5$ , а ширина обкладки  $b = 4$  см.

Данные табл. 3 показывают, что при  $r_s = 5$  ом тангенс угла потерь, обусловленный потерями в обкладках, только при частоте 10 кгц достигает значений, которые становятся заметными в общем балансе потерь металлобумажного конденсатора. Надо, однако, учесть, что секция конденсатора может иметь ширину обкладки и более

Таблица 3

**Зависимость составляющей тангенса угла потерь металлобумажных конденсаторов, обусловленной потерями в обкладках от сопротивления слоя металла**

| Сопротивление слоя металла, $r_s$ , ом | Составляющая $\text{tg } \delta_{\text{обк}}$ , обусловленная потерями в обкладках |                     |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|                                        | при 50 гц                                                                          | при 10 кгц          |
| 5                                      | $8 \cdot 10^{-6}$                                                                  | $1,6 \cdot 10^{-3}$ |
| 3                                      | $4,8 \cdot 10^{-6}$                                                                | $9,6 \cdot 10^{-4}$ |
| 1                                      | $1,6 \cdot 10^{-6}$                                                                | $3,2 \cdot 10^{-4}$ |

4 см (в обычной практике до 10 см); поэтому величину  $r_s = 5$  ом следует признать предельной, если основываться на допустимом значении угла потерь металлобумажного конденсатора.

## § 6. Влияние структуры металлического слоя на качество металлобумажного конденсатора

Японским исследователем Сасаки Хадзими было проведено испытание металлобумажных конденсаторов с цинковыми обкладками, имеющими различную кристаллическую структуру. Исследуемые конденсаторы имели емкость 0,5—8 мкф и были рассчитаны на номинальное напряжение 150—350 в. Конденсаторы испытывались в течение 250—350 часов при температуре 80° С и напряжении, составляющем 1,25 номинального значения, причем основным критерием качества конденсатора служила его постоянная времени.

Структура металлического слоя изучалась с помощью электронного микроскопа. Было установлено, что наиболее высокая постоянная времени получается у конденсаторов, имеющих крупнокристаллический слой; при толщине слоя 0,05—0,09 мк размеры кристаллов цинка у таких образцов составляли 0,2—0,4 мк. Такую структуру цинкового слоя удавалось получать при остаточном давлении в процессе испарения порядка  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  мм рт. ст., т. е. при более низком давлении, чем принято в обычной практике.

Опыты показали, что для получения конденсаторов высокого качества структура слоя должна быть не только крупнокристаллической, но и максимально однородной.

При неупорядоченном расположении кристаллов в металлическом слое после пробоя и самовосстановления изолированный участок вокруг места пробоя имеет неправильную форму, а на поверхности диэлектрика остаются следы разрушения. При уменьшении размеров кристаллов цинка постоянная времени снижается, это особенно заметно при повышенных значениях температуры и напряжения.

Было высказано предположение, что структура слоя может влиять на устойчивость слоя против электрохимической коррозии, обусловленной контактом цинка, образующего металлическое покрытие на бумаге, с более пассивными металлами: железом и медью, присутствующими в бумаге в виде включений малого размера. Для проверки было проведено рентгенографическое исследование цинковых обкладок, проходивших испытания в конденсаторах. Опыты показали, что коррозионная стойкость цинкового слоя действительно зависит от размеров кристаллов и степени их упорядоченности в металлической пленке и с увеличением размеров кристаллов отрицательное влияние пассивных металлов ослабляется.

О влиянии структуры металлического слоя на свойства металлобумажных конденсаторов упоминается также в патенте ФРГ\*, полученном Майландтом и Штребом. Эти исследователи изучали влияние структуры слоя на зависимость угла потерь металлобумажного конденсатора от напряжения. Как известно, перегиб этой кривой свидетельствует о начале в диэлектрике конденсатора ионизационных процессов. По мнению немецких исследователей, развитие ионизации вызывается местными повышениями напряженности поля у краев и выступов металлического (цинкового) слоя. Было установлено, что для ослабления ионизационных процессов следует добиваться получения крупнокристаллической структуры слоя. При обычных режимах металлизации, когда слой цинка имеет серебристый блеск, размеры кристаллов, в среднем, порядка 0,02 мк. Рекомендуется изменять режим металлизации с таким расчетом, чтобы добиваться получения металлического слоя с синеватым блеском, которому соответствует средний размер кристаллов порядка 0,1 мк. При этом зависимость угла потерь от напряжения резко ослабляется, как показывает рис. 12, на котором кривая  $I$  соответствует

---

\* Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, № 975866, 8. 11. 1962.

серебристому мелкокристаллическому слою, а кривая 2 — синеватому, крупнокристаллическому.

Некоторые сведения о структуре цинкового слоя в металлобумажных конденсаторах сообщает также французский исследователь Хюро. Он отмечает, что кристаллизация цинка происходит в компактной гексагональной системе, причем малые кристаллиты ориентируются параллельно поверхности бумажной ленты. По данным этого

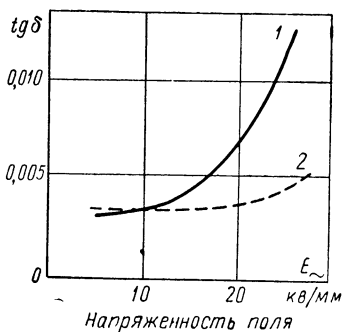


Рис. 12. Влияние структуры металлического слоя на ход зависимости угла потерь металлобумажного конденсатора от напряжения

1 — мелкокристаллический слой;  
2 — крупнокристаллический слой (Штрёб).

в металлобумажных конденсаторах стоит уделить внимание, так как видимо в этом направлении можно добиться дополнительного повышения качества этих конденсаторов.

## § 7. Лаковое покрытие на бумаге и его влияние на электрические характеристики конденсаторов

При рассмотрении вопроса о механизме самовосстановления металлобумажного конденсатора при замыкании его обкладок проводящим включением в диэлектрике предполагалось, что это включение имеет малое сопротивление и сила тока короткого замыкания в обкладке достаточно велика, чтобы расплавить металл вокруг места замыкания. Это предположение справедливо для металлических и угольных включений с очень низким сопротивлением.

исследования средний диаметр кристаллитов составляет 0,025 мк, причем, как для серебристых, так и для синеватых слоев. По его мнению синеватый оттенок слоя зависит не от размеров кристаллов, а только от большей степени окисления слоя. Толщина слоя в опытах Хюро составляла 0,07 мк.

Таким образом, его данные не согласуются с результатами немецких исследователей, утверждающих, что цвет слоя определяется размерами кристаллов.

Приведенные здесь данные показывают, что вопросу о структуре цинкового слоя

Наличие металлических включений в изоляции металлобумажных конденсаторов было экспериментально подтверждено В. И. Скрипкиным, который измерял температурную зависимость сопротивления изоляции однослойных металлобумажных конденсаторов с цинковыми обкладками, у которых сопротивление изоляции было резко понижено. Результаты этих измерений он сопоставил с температурной зависимостью сопротивления металлического цинка. Опыты показали, что среднее значение температурного коэффициента сопротивления изоляции у таких конденсаторов равнялось  $37,6 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ , а для металлического цинка  $37 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ .

Такое хорошее совпадение значений температурного коэффициента сопротивления свидетельствует о том, что сопротивление изоляции дефектных металлобумажных конденсаторов в основном определялось металлическими мостиками из цинка на изолированных участках; эти мостики, по-видимому, появились вследствие попадания металлического цинка в сквозные отверстия в бумаге.

В предыдущем параграфе было показано, что в нормальных случаях такие включения с низким сопротивлением изолируются за счет разрушения обкладки вокруг места включения. Однако, наряду с хорошо проводящими включениями, в бумаге присутствуют также полупроводниковые включения в виде окислов металлов, солей и т. п. Для таких включений распределение приложенного извне напряжения между обкладкой и включением может быть неблагоприятным и падение напряжения на обкладке вокруг места включения окажется недостаточным, чтобы расплавить металл в зоне восстановления изоляции. В этих случаях включения остаются в бумаге неизолированными и понижают общее сопротивление изоляции.

Для того чтобы исключить вредное влияние полупроводящих включений, целесообразно покрывать бумагу перед металлизацией тонкой пленкой изоляционного лака и наносить обкладку на лакированную поверхность бумаги.

Сравнительные испытания секций конденсаторов из лакированной и нелакированной бумаги показывают, что покрытие бумаги лаковой пленкой толщиной 1—1,5 мк заметно повышает пробивное напряжение конденсаторной секции и увеличивает сопротивление изоляции в 50—100 раз.

Мак Лин, измеряя зависимость сопротивления изоляции непропитанных секций из лакированной и нелакированной бумаги от относительной влажности, получил кривые, представленные на рис. 13. Секции перед измерением выдерживались при каждом значении влажности до установления равновесия. Результаты этих измерений показы-

вают, что секции из лакированной бумаги имеют значительно более высокое сопротивление изоляции, причем различие в сопротивлении изоляции секций из лакированной и нелакированной бумаги тем больше, чем выше относительная влажность.

Поскольку известно, что равновесное количество воды, поглощенное лакированной и нелакированной бумагой, одинаково, полученный результат находит объяснение в том, что лаковая пленка, расположенная между металлической обкладкой и увлажненной бумагой, представляет собой барьер, задерживающий перемещение ионов из бумаги к металлической обкладке.

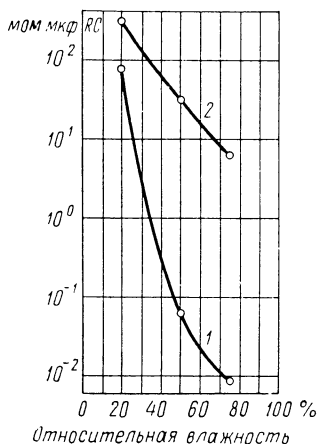
Это предположение находит подтверждение в том, что в непропитанных конденсаторных

Рис. 13. Зависимость постоянной времени непропитанных секций металлобумажных конденсаторов от относительной влажности воздуха

1 — нелакированная бумага;  
2 — лакированная бумага (Мак Лин).

секциях из нелакированной бумаги, выдержанных при относительной влажности 50% в течение 8 дней под напряжением 45 в, обкладка, соединенная с положительным полюсом источника напряжения, была сильно разрушена коррозией и емкость секций существенно уменьшилась. Испытание в таких же условиях секций из лакированной бумаги привело к значительно меньшему повреждению обкладки и меньшему снижению емкости.

Таким образом, покрытие бумаги перед металлизацией лаковой пленкой не только увеличивает начальное сопротивление изоляции конденсаторной секции, но и замедляет электролитическое коррозионное разрушение обкладок при эксплуатации конденсатора. Вследствие этого



в промышленном производстве металлобумажных конденсаторов, как правило, бумага перед металлизацией покрывается тонкой пленкой специально подобранного лака, и обкладка наносится на лакированную поверхность бумаги. Лакирование бумаги особенно существенно для однослойных металлобумажных конденсаторов.

### § 8. Зависимость числа импульсов напряжения, соответствующих пробое и самовосстановлению металлобумажного конденсатора, от времени и напряжения

Как отмечалось выше, при пробое металлобумажного конденсатора происходит удаление металлического слоя на небольшом участке, окружающем место пробоя, причем последнее изолируется от обкладок, и электрическая прочность конденсатора быстро восстанавливается. Осциллограмма явления самовосстановления, снятая для конденсатора емкостью 2 мкф и номинальным напряжением 160 в Хейвангом и Прессингером, показана на рис. 14. В данном случае весь процесс занял время менее 5 мксек. Пробой данного конденсатора произошел при номинальном напряжении, что обычно редко имеет место.

Французский исследователь Майёр указывает значение длительности процесса до 300 мксек, отмечая, что характер импульса напряжения при самовосстановлении мало зависит от параметров цепи. Германские исследователи отмечают, что импульс имеет относительно пологий фронт, в зависимости от величины сопротивления цепи, и крутой спад после максимума. Можно думать, что значение 300 мксек является явно преувеличенным; правдоподобное время составляет величину порядка  $10^{-5}$  сек или немного меньше.

Общее количество таких импульсов (пробоев и самовосстановлений), которое может произойти за время



Рис. 14. Осциллограмма пробоя металлобумажного конденсатора.

работы конденсатора, или количество импульсов, происходящее в единицу времени, важно знать по двум причинам:

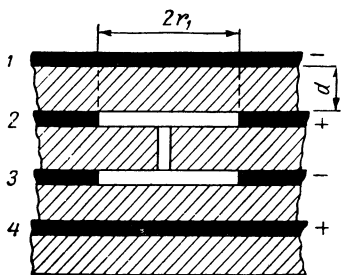
а) при каждом импульсе теряется часть площади обкладки, что должно отражаться на величине емкости конденсатора;

б) наличие импульсов в цепи, в которую включен металлобумажный конденсатор, может оказаться вредным для работы этой цепи, так как импульсы могут вызывать шумы и другие нежелательные явления, особенно, если

используется одновременно не один, а много конденсаторов, как например, в устройствах проводной связи.

Если предположить, что при самовосстановлении вокруг места пробоя образуется лишенный металла участок, имеющий форму круга с радиусом  $r_1$ , и учесть, что обычно металл удаляется сразу с двух обкладок, прилегающих с обеих сторон к каналу пробоя, то можно подсчитать потерю емкости при единич-

Рис. 15. К расчету потери емкости металлобумажного конденсатора при единичном пробое.



ном пробое на основе следующих соображений (рис. 15).

1. При пробое между обкладками 2 и 3 и удалении металла с площади  $\pi r_1^2$  на этих обкладках будет потеряно утроенное значение емкости

$$C = 0,0884 \frac{\pi r_1^2 \epsilon}{d},$$

так как исчезнет емкость между обкладками 2 и 3, а также емкость от обкладки 2 к обкладке 1 и от обкладки 3 к обкладке 4. Все эти емкости соответствуют одной и той же толщине диэлектрика  $d$ .

2. Наряду с этим возникает новая небольшая емкость между обкладками 1 и 4, которой будет соответствовать толщина диэлектрика  $3d$ . В связи с этим общее изменение емкости при единичном импульсе пробоя будет составлять:

$$\Delta C = 3C - \frac{1}{3} C = 0,0884 \frac{\pi r_1^2 \epsilon}{d} \left( 3 - \frac{1}{3} \right) \quad (17)$$

или

$$\Delta C = 0,735 \frac{r_1^2 \epsilon}{d} [нф]; \quad (18)$$

здесь размеры  $r_1$  и  $d$  в см.

Если принять толщину диэлектрика равной 6 мк, а величину  $r_1$  взять порядка 1 мм, то потеря емкости при единичном импульсе будет равна:

$$\Delta C = 0,735 \cdot \frac{0,1^2 \cdot 4,5}{6 \cdot 10^{-4}} = 55 \text{ нф.}$$

При емкости конденсатора 1 мкф это составит всего лишь около 0,005% от общей емкости. В этом случае потребуется не менее 200 импульсов, чтобы емкость изменилась на 1%. Фактически, при нормальном рабочем напряжении, площадь деметаллизации будет значительно меньше, чем мы приняли в нашем расчете, а номинальная емкость — выше и изменение емкости на 1% потребует значительно большего числа импульсов. Таким образом, для того чтобы существенно изменить емкость конденсатора, потребуется не несколько сотен, а несколько тысяч или даже десятков тысяч импульсов.

Для оценки влияния импульсов напряжения при пробоях и самовосстановлениях металлобумажных конденсаторов, используемых в системах проводной связи или в других устройствах, чувствительных к такого рода импульсам, надо получить представление о частоте повторения таких импульсов в различных условиях работы металлобумажных конденсаторов.

Количество импульсов должно зависеть прежде всего от напряжения, приложенного к конденсатору. Легко предположить, что при небольшом напряжении, когда пробой мало вероятен, импульсы не будут иметь места. По мере увеличения напряжения вероятность пробоя диэлектрика начнет возрастать, а следовательно, должно возрасть и количество импульсов напряжения, происходящих при пробое. При некоторой величине напряжения, когда вероятность пробоя приближается к 100%, импульсы должны следовать один за другим и число их в единицу времени будет весьма значительным. Влияние возрастания напряжения на количество импульсов в единицу времени наглядно характеризуется осциллограммой, взятой из работы швейцарского исследователя Эльснера (рис. 16). На

этом рисунке  $U_1$  — напряжение на конденсаторе в момент пробоя, а  $U_2$  — напряжение, при котором уже закончился процесс самовосстановления.

Вопросом влияния числа импульсов на работу устройств проводной связи занимался Майёр во Франции. По его данным при небольших напряжениях импульсов не наблюдается в течение многих тысяч часов. Если повышать напряжение, то импульсы самовосстановления наблюдаются в течение первых часов работы, а затем прекращаются. При еще большем напряжении число импульсов возрастает со временем, обыч-

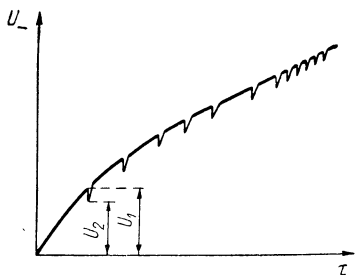


Рис. 16. Осциллограмма, показывающая увеличение числа пробоев с увеличением напряжения.

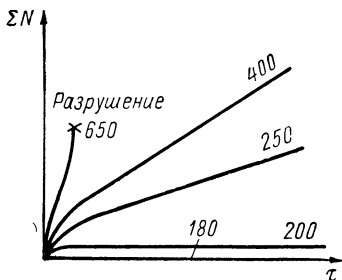


Рис. 17. Зависимость числа пробоев металлобумажного конденсатора от времени при различных напряжениях (цифры у кривых — величина напряжения в в) (Майёр).

но, практически линейно. При некотором напряжении число импульсов резко увеличивается и конденсатор быстро погибает.

Зависимость суммарного числа импульсов от времени при воздействии различных напряжений, полученная Майёром для металлобумажного конденсатора с номинальным напряжением 160 в, показана на рис. 17. Цифры у кривых показывают напряжение испытания в вольтах. Испытания проводились при температуре  $70^{\circ}\text{C}$ . Майёр предложил использовать для металлобумажных конденсаторов два значения номинального напряжения: а) напряжение «высокой надежности», при котором еще не наблюдается импульсов самовосстановления; б) напряжение «обычной надежности», при котором на линейном участке зависимости суммарного числа импульсов от времени происходит не более 8 импульсов в час. Отношение второго значения напряжения к первому составляет около 1,6.

Таким образом, для конденсаторов с напряжением высокой надежности 160 и 400 в соответствующие значения напряжения обычной надежности составляют 250 и 630 в. При использовании металlobумажных конденсаторов при напряжениях, не превышающих номинальное напряжение высокой надежности, можно не опасаться, что они смогут внести нежелательные шумы в телефонные сети.

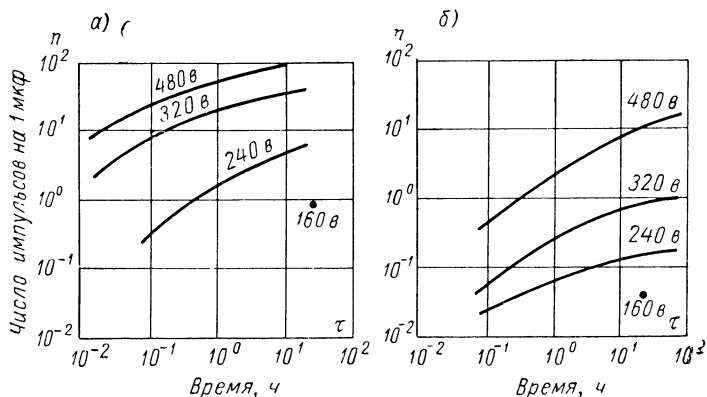


Рис. 18. Зависимость числа импульсов (числа пробоев), рассчитанных на единицу емкости металlobумажных конденсаторов, от времени при различных напряжениях (напряжения указаны цифрами у кривых) для конденсаторов, прошедших нормальную тренировку: *а* — конденсаторы 1955 г.; *б* — конденсаторы 1959 г. (Хейванг, Прейсснер).

Большая работа по изучению количественной стороны зависимости числа импульсов самовосстановления от напряжения, приложенного к металlobумажному конденсатору, была проведена в ФРГ Хейвангом и Прейсснером, которые разработали и применили специальную установку для точного подсчета таких импульсов. Эта работа проводилась на протяжении нескольких лет, что позволило, в частности, отметить улучшение качества конденсаторов за период времени с 1955 по 1959 г. На рис. 18 показана зависимость суммарного числа импульсов самовосстановления, рассчитанных на единицу емкости от времени работы конденсаторов с номинальным напряжением 160 в при напряжениях  $U_{\text{ном}}$ ;  $1,5 U_{\text{ном}}$ ;  $2U_{\text{ном}}$  и  $3U_{\text{ном}}$ ; левая часть рисунка соответствует 1955 г., а правая — 1959 г. Заметно снижение числа импульсов при всех

значениях напряжения для конденсаторов 1959 г., несмотря на то, что в 1955 г. испытание производилось при  $70^{\circ}\text{C}$ , а в 1959 г. при  $85^{\circ}\text{C}$ .

Приведенные здесь данные относятся к нормальным конденсаторам, прошедшим тренировку напряжением, т. е. в исходном состоянии у этих конденсаторов часть дефектных мест уже была изолирована от обкладок. В 1959 г. было также проведено испытание конденсаторов, не про-

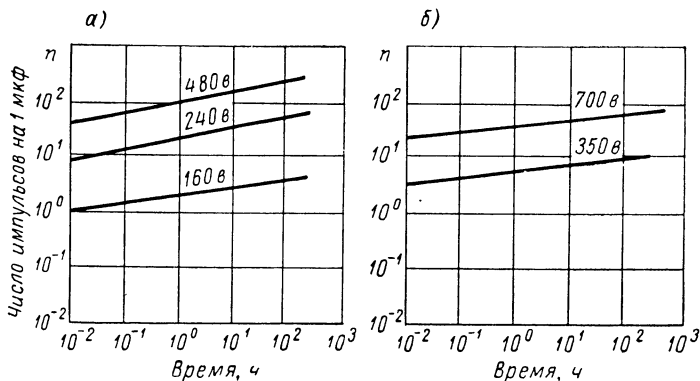


Рис. 19. Зависимость числа импульсов, рассчитанных на единицу емкости, от времени, при различных напряжениях, для металлобумажных конденсаторов, не проходивших тренировки: а — номинальное напряжение 160 в; б — номинальное напряжение 350 в (Хейванг, Прейсснер).

ходивших тренировки: для них было установлено, что зависимость числа импульсов самовосстановления, рассчитанных на 1 мкф, от времени испытания, построенная в билогарифмической системе координат, выражается прямой линией (рис. 19). Это позволило получить эмпирические формулы для количественного выражения данной зависимости.

Число импульсов самовосстановления, рассчитанное на единицу емкости  $n$  и происходящее за время  $\tau$ , может быть представлено как

$$n = n_0 \left( \frac{\tau}{L} \right)^{1/c}. \quad (19)$$

Здесь значение  $c$  лежит в пределах от 6,9 до 9, составляя в среднем около 8. Для конденсаторов с номинальным

напряжением 160 в при значениях  $n_0 = 1 \text{ мкф}^{-1}$  величина  $L = 30 \text{ сек} = 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ ч}$ .

Значение времени  $L$  можно выразить как функцию от напряжения:

$$L = L_0 \left( \frac{U_0}{U} \right)^b, \quad (20)$$

где значение  $b = 18\text{—}46$ , в среднем  $25\text{—}30$ ;  $U_0$  — значение напряжения, соответствующее величинам  $n_0$  и  $L_0$ .

Подставляя значение  $L$  по формуле (20) в выражение (19), получаем:

$$n = n_0 \left( \frac{U}{U_0} \right)^{b/c} \left( \frac{\tau}{L_0} \right)^{1/c}, \quad (21)$$

где  $b/c = 2,6\text{—}5,9$ , в среднем 4. Таким образом, число импульсов самовосстановления при увеличении напряжения возрастает примерно в зависимости от 4-й степени напряжения.

Полезно отметить, что по данным рис. 18 количество импульсов в единицу времени даже при двойном номинальном напряжении очень мало и значительно ниже той границы (8 импульсов в час), которую установил Майёр для конденсаторов «обычной надёжности». Можно полагать поэтому, что номинальное напряжение, установленное в ФРГ, соответствует французскому понятию «высокой надёжности».

---

## ГЛАВА ВТОРАЯ

# МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛОБУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

### § 9. Конденсаторная бумага

Основным материалом, составляющим диэлектрик в металлобумажных конденсаторах, является конденсаторная бумага.

В производстве металлобумажных конденсаторов, так же как и в производстве бумажных конденсаторов с обкладками из фольги, применяется тонкая целлюлозная бумага, изготовляемая из сульфатной целлюлозы.

Основным твердым веществом, из которого состоит современная конденсаторная бумага, является клетчатка (целлюлоза). Это вещество представляет собой полимерный углевод  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , молекулы которого имеют вид длинных цепей с числом звеньев, достигающим 2000. В каждом звене молекулы клетчатки содержится три гидроксильных группы — OH, что определяет ее полярность и относительно высокую диэлектрическую проницаемость.

Пучки молекулярных цепей клетчатки образуют субмикроскопические структурные элементы целлюлозы — мицеллы. Мицеллы имеют длину 150—200 Å и диаметр 20—50 Å.

Скопления мицелл в виде тонких трубочек образуют элементарные волокна — фибриллы. Растительное волокно клетчатки построено из фибрилл, вытянутых вдоль его оси. Длина волокна составляет от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров; диаметр волокна 0,02—0,07 мм.

Для изготовления конденсаторной бумаги применяется целлюлоза из хвойной древесины, содержащая

85—90 % чистой клетчатки (так называемой «альфа-целлюлозы»).

Соответствующая переработка древесной целлюлозы на бумажных фабриках позволяет получать конденсаторную бумагу, отличающуюся очень малой толщиной, высокой плотностью, высокой механической прочностью и ничтожно малым содержанием неорганических примесей.

Современная конденсаторная бумага поставляется в виде длинных лент, однородных по толщине, намотанных в рулоны (бобины). Ширина ленты определяется при заказе в пределах от 6—10 мм до 250—300 мм. В производстве металлобумажных конденсаторов, в соответствии с конструкцией машин для лакирования бумаги, обычно применяется бумага шириной 240—250 мм. Толщина современных конденсаторных бумаг от 4—5 мк до 30 мк.

По плотности (объемному весу) в Советском Союзе различают два сорта конденсаторной бумаги: КОН-1 с плотностью 1 г/см<sup>3</sup> и КОН-2 с плотностью 1,2 г/см<sup>3</sup>. Бумага сорта КОН-1 применяется главным образом в производстве силовых конденсаторов для цепей переменного тока, бумага сорта КОН-2 — в производстве радиотехнических конденсаторов с обкладками из фольги и металлизированными обкладками.

В настоящее время поставлен вопрос о выпуске двух новых сортов бумаги: с плотностью 0,8 г/см<sup>3</sup> и 1,3 г/см<sup>3</sup>. Последняя может представить собой интерес для применения в металлобумажных конденсаторах.

Повышение плотности конденсаторной бумаги достигается пропусканием ее в увлажненном состоянии через многовальный календарь. По данным Штрёба\* при этом надо добиваться того, чтобы одна сторона бумаги приобретала высокую гладкость, обеспечивающую высоту неровностей не выше 1 мк. При металлизации бумаги с гладкой стороны можно получить улучшение угла потерь металлобумажного конденсатора при его использовании в цепях переменного тока (рис. 20). Двустороннее выглаживание бумаги применять не следует, так как это приводит к ухудшению сушки конденсаторных секций, поскольку замедляется отдача влаги бумагой.

---

\* Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, № 974836, 10. 05. 1961.

Механическая прочность конденсаторной бумаги весьма высока; временное сопротивление разрыву воздушно-сухой бумаги составляет около  $1000 \text{ кг/см}^2$ .

Содержание неорганических примесей характеризуется зольностью бумаги. В конденсаторной бумаге хорошего качества зольность не превышает  $0,2\text{--}0,3\%$ .

Весьма важным показателем качества конденсаторной бумаги является число проводящих включений на единицу поверхности бумаги.

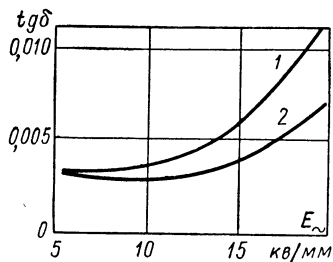


Рис. 20. Влияние качества бумаги на зависимость угла потерь металлобумажного конденсатора от напряжения

1 — обычная бумага; 2 — однослойно-гладкая бумага (Штрёб).

Несмотря на то, что современная технология производства конденсаторной бумаги предусматривает ряд мер, предупреждающих попадание металлов и других проводящих включений в бумажную массу, в числе которых размол бумажной массы на роллах с базальтовой гарнитурой (вместо металлической), магнитная сепарация бумажной массы, очистка воды, применяемой в производстве и т. п., в готовой бумаге всегда присутствует некото-

рое количество проводящих включений в виде металлической пыли, вкраплений солей металлов и частиц углерода. Подсчет проводящих включений на единицу поверхности производится на специальном приборе, в котором бумага проходит между двумя контактными валиками, соединенными с электрической схемой, подсчитывающей число проводящих точек, прошедших между валиками. Принятая в настоящее время методика предусматривает такую настройку схемы, при которой подсчитывающее устройство регистрирует включения с сопротивлением  $r \leq \leq 200 \text{ ком}$ .

На контактные валики при подсчете подается напряжение, равное  $60 \text{ в}$  для бумаг толщиной до  $10 \text{ мк}$  включительно и  $100 \text{ в}$  для бумаг большей толщины.

В конденсаторной бумаге хорошего качества при толщине бумаги  $8 \text{ мк}$  число проводящих включений, подсчитанное по этой методике, составляет  $100\text{--}200$  на  $1 \text{ м}^2$ ; в бумагах толщиной  $15\text{--}30 \text{ мк}$  равно  $5\text{--}10$  на  $1 \text{ м}^2$ .

Конденсаторная бумага, вследствие волокнистой структуры, представляет собой неоднородный диэлектрик. В воздушно-сухом состоянии она содержит 25—30 % воздуха (по объему), 5—7 % воды по весу.

В целях повышения электрической прочности и улучшения электрических характеристик конденсаторные секции, намотанные из бумаги, тщательно высушиваются под вакуумом и пропитываются жидким или твердым при комнатной температуре пропитывающим составом.

Установившиеся представления о структуре конденсаторной бумаги исходят из предположения, что в сечении бумаги по ее толщине прослойки воздуха перемежаются слоями сплюснутых и переплетенных между собой волокон клетчатки. При таком предположении эквивалентная схема замещения бумаги (рис. 21) образ-

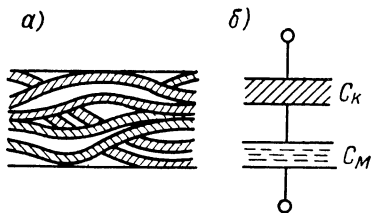


Рис. 21. К рассмотрению структуры конденсаторной бумаги: а — схема строения листа бумаги (заштрихованы слои клетчатки); б — схема, эквивалентная бумаге, пропитанной жидким диэлектриком.

зуется последовательным соединением емкости, представляющей поляризацию клетчатки, и емкости, представляющей поляризацию воздуха (или пропитывающего вещества — для пропитанной бумаги).

Соответственно такой схеме диэлектрическая проницаемость непропитанной или пропитанной жидким диэлектриком бумаги может быть рассчитана по формуле:

$$\epsilon_6 = \frac{\rho_k \epsilon_k}{\rho_k \frac{\epsilon_k}{\epsilon_m} - \rho \left( \frac{\epsilon_k}{\epsilon_m} - 1 \right)}, \quad (22)$$

где  $\epsilon_k$  — диэлектрическая проницаемость клетчатки (обычно принимается равной 7);

$\epsilon_m$  — диэлектрическая проницаемость жидкого пропитывающего диэлектрика (для непропитанной бумаги  $\epsilon_m = 1$ );

$\rho$  — плотность бумаги;

$\rho_k$  — плотность клетчатки, принимаемая равной 1,5—1,55 г/см<sup>3</sup>.

Для бумаги, пропитанной твердым воскообразным веществом, имеющим значительную усадку при отвердевании, формула (16) принимает вид:

$$\epsilon_6 = \frac{\epsilon_k p_k}{\frac{\epsilon_k}{\epsilon_m} (p_k - p) (1 - y) + \epsilon_k (p_k - p) y + p}, \quad (23)$$

где  $y$  — объемная усадка пропитывающего вещества, равная для церезина 0,15—0,2.

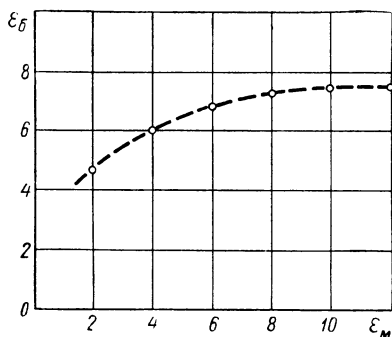


Рис. 22. Зависимость диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги от диэлектрической проницаемости пропиточной массы.

Из приведенных формул видно, что с ростом  $\epsilon_m$  пропитывающего состава растет диэлектрическая проницаемость всего диэлектрика. Для клетчатки  $\epsilon_k$ , определенная косвенным способом, составляет около 7. Поэтому увеличение  $\epsilon_m$  пропитывающего состава до 7 приводит к значительному приросту диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги (рис. 22). При дальнейшем увеличении  $\epsilon_m$  пропитывающего состава прирост диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги незначителен.

Пропитанная конденсаторная бумага по величине диэлектрической проницаемости занимает одно из первых мест среди органических конденсаторных материалов. Конструкция металlobумажного конденсатора, в котором отсутствуют прослойки пропитывающего состава между бумагой и обкладками, обеспечивает получение значительно большей удельной емкости, чем в бумажных конденсаторах с обкладками из фольги. Сочетание высоких значений диэлектрической проницаемости и электрической прочности (для пропитанной бумаги  $E_{пр} = 150—200$  кВ/мм) определяют весьма малые габариты металlobумажных конденсаторов.

## § 10. Лаковые покрытия бумаги

Лаковая пленка на конденсаторной бумаге, подвергающейся металлизации, должна удовлетворять ряду физических и электрических требований; к ним относятся:

достаточная нагревостойкость, обеспечивающая возможность последующей сушки бумаги и пропитки секций без размягчения лаковой пленки; сохранение в течение длительного времени эластичности во всем интервале рабочих температур конденсатора; отсутствие химически активных компонентов в самой пленке и продуктах ее разложения, способных вызывать коррозионное разрушение металлического покрытия; высокие электрические характеристики (электрическая прочность, удельное объемное сопротивление и диэлектрическая проницаемость).

Совокупности этих требований в большей или меньшей степени удовлетворяют лаковые пленки из сложных и простых эфиров целлюлозы. В табл. 4 приведены основные характеристики некоторых эфиров целлюлозы, пригодных для лакирования бумаги.

Таблица 4

Свойства пленок из эфиров целлюлозы

| Свойства                                                 | Ацетил-<br>целлюлоза             | Бензил-<br>целлюлоза               | Этилцеллю-<br>лоза            |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| Температура плавления, °С                                | Разлагается<br>до плав-<br>ления | 145—170                            | 165—185                       |
| Диэлектрическая проницае-<br>мость . . . . .             | 3,5—4,0                          | 2,7—2,8                            | 3,2—3,3                       |
| Тангенс угла потерь при ча-<br>стоте $10^8$ гц . . . . . | 0,033—0,038                      | 0,009—0,019                        | 0,023—0,024                   |
| Удельное объемное сопро-<br>тивление, ом·см . . . . .    | $6 \cdot 10^{14}$                | $1,7 \cdot 10^{15}$ —<br>$10^{17}$ | $2 \cdot 10^{15}$ — $10^{17}$ |
| Электрическая прочность,<br>кв/мм . . . . .              | 78                               | 104—110                            | 96                            |

Из табл. 4 видно, что пленки из эфиров целлюлозы по электрическим характеристикам в основном удовлетворяют требованиям производства металлобумажных конденсаторов. При выборе пленок существенное значение имеет величина диэлектрической проницаемости лакового покрытия. Как показывает опыт, при лакировании бумаги поры в ней заполняются лаком, вследствие чего диэлектрическая проницаемость бумаги, согласно уравнению (22), увеличивается с повышением диэлектрической проницаемости лаковой пленки.

Помимо этого лакированная бумага представляет собой двухслойный диэлектрик, состоящий из слоя лаковой пленки и слоя пропитанной лаком бумаги. Диэлектрическая проницаемость такого диэлектрика определяется выражением:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_6 \varepsilon_{\text{л}} d}{\varepsilon_6 d_{\text{л}} + \varepsilon_{\text{л}} d_6}, \quad (24)$$

где  $\varepsilon_6$  — диэлектрическая проницаемость пропитанной бумаги;

$\varepsilon_{\text{л}}$  — диэлектрическая проницаемость лаковой пленки;

$d$  — суммарная толщина диэлектрика;

$d_6$  — толщина бумаги;

$d_{\text{л}}$  — толщина лаковой пленки.

Уравнение (24) показывает, что повышение диэлектрической проницаемости лаковой пленки увеличивает общую диэлектрическую проницаемость всего диэлектрика.

В свете этих данных следует отдать предпочтение ацетилцеллюлозной пленке, у которой диэлектрическая проницаемость на 25—30% выше, чем у других эфиров целлюлозы. Этот материал нашел широкое применение в зарубежном производстве металлобумажных конденсаторов. Однако присутствие в ацетилцеллюлозе незначительного количества уксусной кислоты, возрастающего по мере старения пленок, приводит к ускоренному разрушению металлических обкладок конденсатора. Вследствие этого в Советском Союзе в производстве металлобумажных конденсаторов применяется лакировка бумаги этилцеллюлозным лаком. Нельзя, однако, считать, что применение этилцеллюлозного покрытия на бумаге является наилучшим решением.

В зарубежной технике для лакировки бумаги применяются и иные типы лаков. Так, французская фирма «Боллоре» выпускает металлизированную бумагу для конденсаторов с применением как ацетилцеллюлозного, так и полистирольного лака. Последний дает снижение угла потерь металлизированной бумаги, но вместе с тем снижает также ее результирующую  $\varepsilon$ , а также имеет меньшую нагревостойкость, чем эфиры целлюлозы. Японские фирмы работают над проблемой получения лаков с большей нагревостойкостью, чем у эфиров целлюлозы. В работе Кудо сообщается об испытании лаков на основе мочевины-

ной и меламинаовой смол с применением в качестве растворителя бутилового спирта. Содержание смолы в лаке составляло 50—60%.

При температуре ниже  $30^{\circ}\text{C}$  для пленок этих лаков было получено значение  $q_v > 10^{14} \text{ ом}\cdot\text{см}$ ; для лаковой пленки на основе мочевины  $\varepsilon = 5\text{—}6$  и  $\text{tg } \delta = 0,03\text{—}0,04$ , а для пленки меламинаового лака  $\varepsilon = 4$ , а  $\text{tg } \delta =$

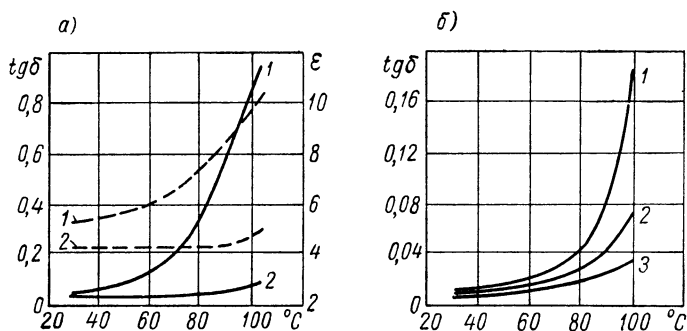


Рис. 23. Характеристики мочевиного и меламинаового лаков: а — зависимость диэлектрической проницаемости (пунктир) и угла потерь (сплошные кривые) от температуры

1 — мочевиный лак; 2 — меламинаовый лак.

б — температурная зависимость угла потерь для трех образцов лака на основе мочевиной смолы

1 — обычный; 2 — с содержанием 0,02% меди; 3 — с добавкой титаната бария (Кудю)

$= 0,01\text{—}0,02$ , т. е. существенно ниже, чем в случае мочевины. Сравнение температурного хода  $\varepsilon$  и  $\text{tg } \delta$ , показанное на рис. 23, а, позволяет отдать предпочтение меламинаовому лаку. Однако характеристики лака на основе мочевины можно заметно улучшить, вводя в его состав небольшое количество меди (0,02—0,025%) или добавляя к нему порошок  $\text{BaTiO}_3$  (рис. 23, б).

Опытные конденсаторы, изготовленные с применением лакировки бумаги меламинаовым лаком и облагороженным мочевиным, дали близкие результаты при определении их электрических свойств. При нормальной температуре постоянная времени составляла 1000—3000  $\text{Мом}\cdot\text{мкф}$ , а  $\text{tg } \delta$  был равен 0,004—0,005. Изменение емкости по отношению к ее значению при комнатной температуре составило  $-2\%$  при  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $+2\%$  при  $70^{\circ}\text{C}$  и  $+4\div 7\%$  при  $110^{\circ}\text{C}$ .

Эти данные относятся к однослойным конденсаторам емкостью 1 мкф; толщина бумаги 10 мк, толщина слоя лака 0,1—1,2 мк, толщина слоя цинка 0,03—0,05 мк. Сделан вывод о целесообразности применения мочевиновых и меламиновых лаков для изготовления металlobумажных конденсаторов повышенной нагревостойкости.

Приведенные выше соображения показывают целесообразность применения лаковой пленки с более высокой диэлектрической проницаемостью, чем у этилцеллюлозы. Повышение  $\epsilon$  лаковой пленки особенно существенно в конденсаторах, предназначенных для работы в цепях переменного тока. В этом случае, поскольку распределение напряженности электрического поля в двухслойном диэлектрике обратно пропорционально значениям  $\epsilon$  отдельных слоев, повышение диэлектрической проницаемости лаковой пленки до значений, близких к общему значению  $\epsilon$  пропитанной бумаги, диктуется не только соображениями о повышении удельной емкости конденсатора, но и необходимостью получить равномерное распределение электрического поля по слоям. При использовании бумаги с лаковым покрытием из этилцеллюлозы на переменном напряжении напряженность поля в лаковом слое более чем в два раза превосходит напряженность поля в бумаге. Такое распределение поля не позволяет эффективно использовать диэлектрик конденсатора, вследствие чего в конденсаторах переменного тока оказалось целесообразным применять нелакированную бумагу.

## § 11. Пропитывающие составы

Для пропитки металlobумажных конденсаторов в зависимости от их назначения применяются твердые (обычно воскообразные) или полужидкие диэлектрики. К пропитывающим веществам предъявляется ряд важных для качества конденсаторов физико-химических и электрических требований.

В конденсаторах с однослойной изоляцией из лакированной бумаги, как упоминалось, поры бумаги заполняются лаком в процессе лакировки. Вследствие этого диэлектрическая проницаемость лакированной бумаги определяется в значительной степени величиной  $\epsilon$  лака и мало зависит от диэлектрической проницаемости пропитывающего состава.

Опыт показывает, что пропитка однослойных секций металлобумажных конденсаторов веществами с высокой диэлектрической проницаемостью не изменяет заметным образом их емкости.

К пропитываемому составу в этом случае должны быть предъявлены следующие требования: а) сохранение твердого состояния и отсутствие хрупкости во всем интервале рабочих температур конденсатора, что, как указывалось в § 3, обеспечивает благоприятные условия гашения дуги при восстановлении изоляции вокруг проводящих включений и мест пробоев; б) отсутствие механических и химически активных загрязнений, что обеспечивает сохранность металлической обкладки и диэлектрика; в) достаточно высокие значения удельного сопротивления и электрической прочности.

Перечисленным требованиям хорошо удовлетворяют естественный и синтетический церезины, которые и находят широкое применение в производстве металлобумажных конденсаторов.

В конденсаторах с многослойной изоляцией (в которых изоляция осуществляется из одной лакированной металлизированной бумаги и одной или нескольких нелакированных и неметаллизированных бумаг), наряду с приведенными выше требованиями, некоторую роль играет и величина диэлектрической проницаемости пропитываемого состава. Применение полярных пропитывающих составов с повышенной  $\epsilon$  в этом случае позволяет несколько увеличить емкость и уменьшить габариты конденсаторов. Однако применение твердых или жидких полярных пропитывающих масс на основе хлорированных углеводородов (галовакса, совола и т. п.) для многослойных металлобумажных конденсаторов недопустимо вследствие присутствия в таких массах активного хлора, который быстро разрушает тонкие металлические обкладки.

Из числа химически инертных полярных высокообразных веществ, которые могли бы быть применены для пропитки многослойных металлобумажных конденсаторов, следует упомянуть продукт гидрогенизации касторового масла — «олеовакс». Этот материал, имея высокую диэлектрическую проницаемость ( $\epsilon = 10 \div 20$ ), может определить существенное уменьшение габаритов конденсаторов. Однако, из-за резкой температурной зависимости диэлектрической проницаемости и повышенного значения

тангенса угла диэлектрических потерь, олеовакс не нашел практического применения в конденсаторостроении.

По зарубежным данным для пропитки металlobумажных конденсаторов начал применяться полярный воскообразный продукт под названием «ланостерол», являющийся продуктом переработки шерстяного жира и имеющий точку плавления выше  $100^{\circ}\text{C}$ . Диэлектрическая проницаемость ланостерола достигает 10—12; он химически нейтрален и не повреждает тонких обкладок металlobумажного конденсатора.

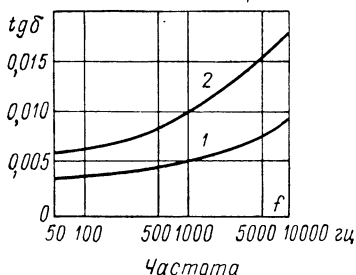


Рис. 24. Зависимость угла потерь металlobумажных конденсаторов от частоты

1 — обычные; 2 — пропитанные ланостеролом (серия К) (Штрёб).

Экспериментальные кривые продолжительности службы металlobумажных конденсаторов, пропитанных этим веществом, дают положительные результаты.

Применение ланостерола позволило фирме «САФ» (ФРГ) получить металlobумажные конденсаторы с двухслойной изоляцией в габаритах, близких к габаритам однослойных конденсаторов. Вероятно в этом случае лакировка бумаги не применялась.

По электрическим характеристикам эти конденсаторы (серия К) несколько отличаются от обычных металlobумажных конденсаторов; в частности, они имеют увеличенный угол потерь, особенно при повышенных частотах (рис. 24). Штрёб сообщает, что емкость конденсаторов, пропитанных ланостеролом, несколько уменьшается при длительном воздействии постоянного напряжения; воздействие номинального напряжения в течение 1000 часов дает снижение емкости на 10—12%. Однако это снижение оказывается обратимым, и после отключения напряжения емкость восстанавливается до исходного значения.

По данным Хельвига, изложенным в германском патенте\*, величина  $\epsilon$  ланостерола зависит от скорости охлаждения пропитанных им конденсаторов после завершения пропитки; при малой скорости охлаждения, ниже

\* Пат. ФРГ, кл. 21g, 10/02, № 1093909, 25. 05. 1961.

50—60 град/ч,  $\epsilon$  может снизиться до 3. Снижение  $\epsilon$  возможно также при работе конденсатора в условиях повышенной температуры. Наблюдаемые изменения диэлектрической проницаемости связаны с изменением структуры ланостерола; в аморфном состоянии он имеет более высокое значение  $\epsilon$ , чем в кристаллическом.

Хельвиг рекомендует применять ланостерол в сочетании с пластифицирующими добавками, подобранными с таким расчетом, чтобы температура размягчения пропитывающего состава была бы выше максимальной рабочей температуры конденсатора, а температура плавления была бы возможно ближе к температуре размягчения. Такая смесь будет быстро застывать до твердого состояния, обеспечивая аморфную структуру и повышенное значение диэлектрической проницаемости, а при рабочей температуре конденсатора не будет кристаллизоваться. Разность  $T_{\text{пл}} - T_{\text{разм}}$  должна быть не выше 20° С, а количество добавки не выше 20 %, чтобы сохранить высокую  $\epsilon$  состава. Хельвиг предлагает следующий состав (по весу): ланостерол 78 %, твердый воск с  $T_{\text{пл}} = 105^\circ \text{С}$  17 % и изобутилполивинилэфир 5 %. Такой состав имеет  $\epsilon = 14$  и  $T_{\text{пл}} = 130^\circ \text{С}$ ; при температуре конденсатора до 80° С состав не кристаллизуется.

Для пропитки многослойных металлобумажных конденсаторов, работающих в цепях с повышенной пульсацией или в цепях переменного тока, целесообразно применять жидкие или полужидкие пропиточные массы. Применение таких масс повышает напряжение начала ионизации и улучшает теплоотвод. В качестве жидких и полужидких пропиточных масс в производстве металлобумажных конденсаторов находят применение вязкие минеральные масла и конденсаторный вазелин.

В табл. 5 сопоставлены основные характеристики пропитывающих составов, применяемых в производстве металлобумажных конденсаторов.

В последнее время в США для пропитки металлобумажных конденсаторов находят также применение полимеризующиеся высокомолекулярные вещества (синтетические смолы и полиэфир).

Для пропитки секций используется мономер. После пропитки секции выдерживаются при температуре, обеспечивающей переход пропитывающего вещества в порах бумаги и прослойках в твердый полимер.

Основные характеристики пропитывающих составов

| Наименование<br>пропитывающего<br>состава | Температура<br>плавления,<br>°C | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> | $\varepsilon$ 20° C<br>1 кгц | $\operatorname{tg} \delta \cdot 10^4$ 20° C<br>1 кгц | $q_{100^\circ \text{C}}$<br>ом·см |
|-------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Церезин . . . . .                         | +80                             | 0,9                             | 2,5                          | 4                                                    | $5 \cdot 10^{12}$                 |
| Синтетический це-<br>резин . . . . .      | +100                            | 0,95                            | 2,5                          | 4                                                    | $1 \cdot 10^{13}$                 |
| Ланостерол . . . .                        | +140                            | —                               | 10—14                        | —                                                    | —                                 |
| Вазелин . . . . .                         | +(30—40)                        | 0,85                            | 2,2                          | 2—3                                                  | $5 \cdot 10^{12}$                 |
| Вязкое минераль-<br>ное масло . . . .     | —(5—10)                         | 0,9                             | 2,1—2,2                      | 1—2                                                  | $1 \cdot 10^{13}$                 |

Усадка при полимеризации значительно меньше, чем при отверждении воскообразных масс, что обеспечивает некоторое повышение электрической прочности конденсаторной изоляции. В связи с высокой температурой размягчения полимера высокомолекулярные пропитывающие вещества находят преимущественное применение в производстве нагревостойких металlobумажных конденсаторов.

Так, например, фирма «Аэровокс» рекламирует металlobумажные конденсаторы с пропиткой твердой массой «аэролен» для интервала рабочих температур от  $-55$  до  $+100^\circ \text{C}$  (при снижении рабочего напряжения на 25% до  $+125^\circ \text{C}$ ), фирма «Корнелл Дюбилль» сообщает о выпуске металlobумажных конденсаторов, пропитанных твердой массой «поликейн», для интервала рабочих температур от  $-55$  до  $+130^\circ \text{C}$ .

В Советском Союзе был испытан в качестве такой твердой массы поливинилкарбазол. Однако этот материал не получил промышленного применения вследствие его токсичности в состоянии мономера.

В настоящее время ведутся дальнейшие исследования по синтезу высокомолекулярных пропитывающих веществ для бумажных и металlobумажных конденсаторов.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

# КОНСТРУКЦИЯ МЕТАЛЛОБУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

### § 12. Особенности конструкции металлобумажных конденсаторов

Металлобумажные конденсаторы в принципе отличаются от бумажных конденсаторов с фольговыми обкладками только толщиной обкладок. Если минимальная толщина фольги составляет 5—6 мк, то толщина нанесенных под вакуумом обкладок металлобумажных конденсаторов обычно не превышает 0,03—0,05 мк, т. е. примерно в 100 раз меньше.

Эта особенность вызывает и другие конструктивные изменения. В частности, для металлобумажных конденсаторов соединение обкладок с проволочными выводами недопустимо с помощью контактных лепестков, вкладываемых при намотке секций, в то время как при фольговых обкладках этот способ широко применяется.

Применение вкладных лепестков в металлобумажных конденсаторах вызывает резкое увеличение тангенса угла потерь, вследствие высокого сопротивления тонких обкладок, и, кроме того, при заряде и разряде конденсатора обкладки разрушаются вблизи лепестков, в результате чего теряется контакт между выводами и обкладками.

Таким образом, снижение толщины обкладок приводит к значительному изменению всей конструкции конденсатора с бумажным диэлектриком. Поэтому на конструкции металлобумажных конденсаторов надо остановиться более подробно.

### § 13. Конструкция секции

Для изготовления металлобумажных конденсаторов постоянного тока бумага перед металлизацией лакируется. Лакировка бумаги, как было указано выше,

улучшает ее электрическую прочность, а также повышает сопротивление изоляции металлобумажного конденсатора.

Бумага металлизуется только с одной (лакированной) стороны с оставлением на одном крае бумажной ленты небольшой полосы, не покрытой металлом («закраины») для изоляции краев обкладок друг от друга.

При намотке секций лентам металлизированной бумаги дается небольшой сдвиг в осевом направлении сек-

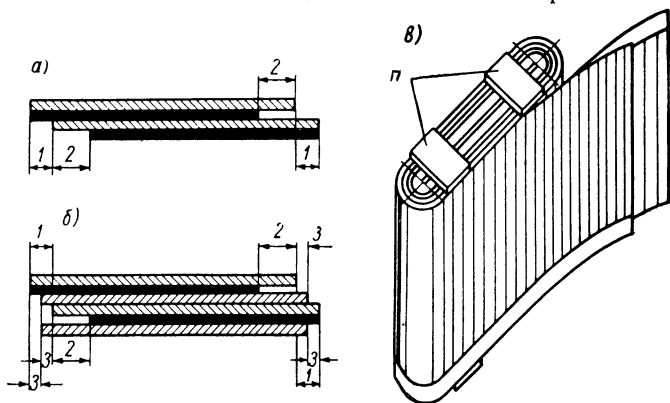


Рис. 25. Расположение лент бумаги при намотке секции металлобумажного конденсатора и контактирование обкладок: *а* — однослойный конденсатор; *б* — двухслойный конденсатор; *в* — секция с контактными полосками (*П*), нанесенными на торец методом напыления.

ции с таким расчетом, чтобы одна обкладка немного выступала с одного торца секции, а вторая — с другого. Это показано схематически на рис. 25, *а*, где бумага обозначена штриховкой, а слои металла — зачернены. Цифрой *1* обозначена величина смещения лент металлизированной бумаги в осевом направлении, а цифрой *2* — размер закраины. При повышенных рабочих напряжениях, при намотке конденсаторных секций, между лентами металлизированной бумаги помещают ленту обычной, неметаллизированной, как показано на рис. 25, *б*. Количество слоев неметаллизированной конденсаторной бумаги может быть и больше одного, в соответствии с величиной напряжения. При этом край неметаллизированной бумаги несколько сдвигается по отношению к краям металлизированных лент. Этот сдвиг обозначен цифрой *3* на рис. 25, *б*. В связи с этим сдвиг между краями металлизированных лент *1*

несколько увеличивают в сравнении с однослойными металlobумажными конденсаторами: если на рис. 25, *а* величину сдвига 1 обычно берут равной 0,2—1 мм, то на рис. 25, *б* эту величину надо принять равной 0,5—2 мм. Величину закраин 2 в обоих случаях выбирают в зависимости от величины рабочего напряжения конденсатора.

Соединение обкладок металlobумажного конденсатора с его выводами («контактирование») производят с помощью проводящих полосок («накладок»), наносимых на торец секции конденсатора методом напыления металла (рис. 25, *в*).

Для обеспечения хорошего качества контакта, необходимо чтобы неметаллизированные кромки металлизированных лент, а также края неметаллизированных бумажных прокладок в многослойных конденсаторах, не выступали на торцах секций. Для этой цели и предусматриваются осевые смещения лент при намотке, показанные выше на рис. 25, *а* и *б*.

Для улучшения надежности контакта иногда увеличивают выступающую на торце поверхность металлического слоя, применяя металлизацию не только по поверхности бумаги с одной ее стороны, но и покрытие металлом торца бумажной ленты, а также небольшой полоски поверхности бумаги у края ленты с противоположной стороны (рис. 26, *а*); в некоторых случаях для получения такого же эффекта загибают край металлизированной бумаги в процессе намотки секции (рис. 26, *б*).

В процессе намотки обычно происходят небольшие смещения лент бумаги, которые дополнительно увеличивают поверхность обкладки, контактирующую с проводящей накладкой на торце. Схема такого контактирования показана на рис. 27.

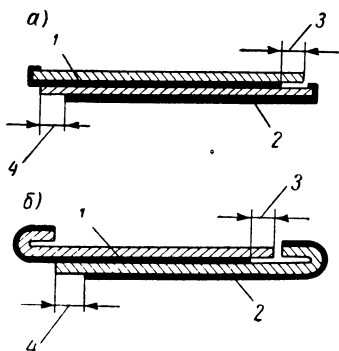


Рис. 26. Способы увеличения количества металла обкладок, выступающего на торцах секций; *а* — двухсторонняя металлизация кромки бумаги; *б* — загибка кромки металлизированной бумаги

1 — слой металла первой ленты;  
2 — слой металла второй ленты;  
3 — экранирующая полоска первой ленты, 4 — экранирующая полоска второй ленты.

Контактирующие полосы (накладки) имеют толщину 0,3—0,7 мм и допускают припайку к ним проволочного вывода. Промежутки на торце секции между полосками, не покрытые металлом, облегчают сушку и пропитку секции.

Для изготовления секций металlobумажных конденсаторов стараются применять минимальное количество значе-

ний ширины бумажных лент. В настоящее время чаще всего используют бумагу шириной 24, 37 и 95 мм.

Из бумаги шириной 24 мм изготавливают конденсаторы малых емкостей для каждого значения рабочего напряжения. Для изготовления конденсаторов с большими емкостями и для повышенного напряжения применяют бумагу большей ширины.

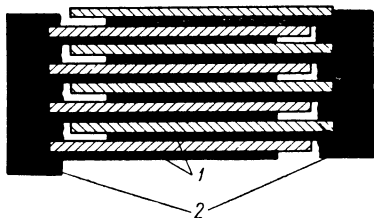


Рис. 27. Схема контактирования секции металlobумажного конденсатора

1 — обкладки; 2 — контактные полосы (накладки) на торце секции.

Секции обычно изготавливают с одним относительно небольшим значением емкости, а конденсаторы большей емкости комплектуют из соответствующего количества параллельно соединенных секций. Так, конденсаторы емкостью от 1 до 4 мкф номинального напряжения 160 в изготавливают из секций емкостью 1 мкф.

## § 14. Конструкция пакета и корпуса

Пакет с заданной емкостью, состоящей из одной или нескольких параллельно соединенных секций, изолируется от корпуса специальной изоляционной коробкой, изготовленной из электрокартона (рис. 28). Изоляционные коробки не имеют разрезов с тех сторон пакета, где расположены контактированные торцы секции.

Для предупреждения возможного пробоя между пакетом и корпусом в углах изоляционной коробки пакет перед укладкой в коробку обертывается несколькими слоями конденсаторной бумаги. Эту бумагу, так же как и изоляционные коробки, предварительно подвергают вакуумной сушке и пропитке церезином или вазелином.

Корпус конденсатора должен надежно защищать секцию от воздействия влаги и других атмосферных явлений при длительном хранении и эксплуатации во всем интервале рабочих температур, а также обладать достаточной механической прочностью, обеспечивая защиту секции

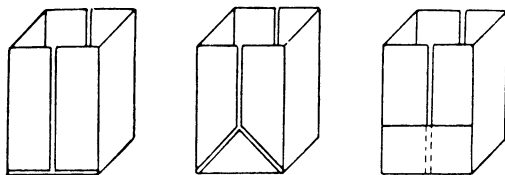


Рис. 28. Коробки из картона для изоляции пакета секций от корпуса.

от механических повреждений и позволяя удобно крепить конденсатор в аппаратуре.

В производстве металlobумажных конденсаторов применяют металлические корпуса прямоугольной или цилиндрической формы. Прямоугольные корпуса обычно изготовляют из стали, а цилиндрические, как из стали, так и из алюминия.



Рис. 29. Основные типы корпусов плоских металlobумажных конденсаторов.

Плоские корпуса изготовляют холодной вытяжкой или пайкой. Цилиндрические корпуса изготовляют обычно из стальных или алюминиевых трубок.

Конденсаторы, предназначенные для работы при температуре до  $85^{\circ}\text{C}$ , имеют припаянную крышку и могут иметь корпуса с паяными швами; конденсаторы, предназначенные для более высоких температур, выпускают только в сварных или изготовленных холодной вытяжкой корпусах с приваренными крышками.

Плоские корпуса металlobумажных конденсаторов имеют три основных типоразмера (рис. 29). Два размера

этих корпусов в пределах каждого типоразмера сохраняются постоянными, а изменяется один третий размер. Сохранение двух размеров корпусов постоянными позволяет изготавливать одинаковые секции для ряда емкостей одного напряжения, что при обширном ассортименте металлобумажных конденсаторов значительно упрощает их производство.

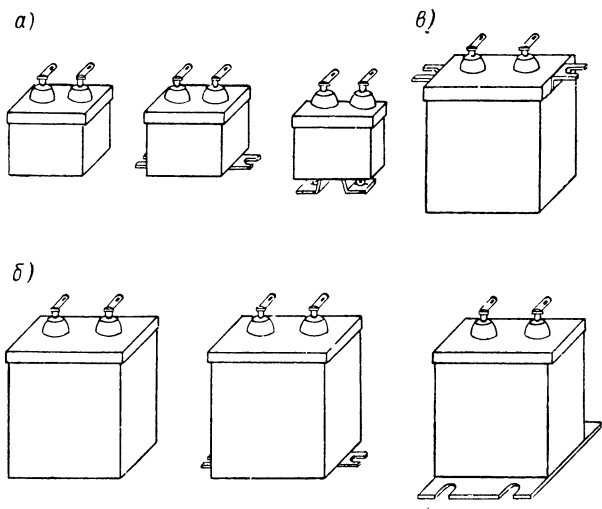


Рис. 30. Виды крепления металлобумажных конденсаторов в плоских корпусах: *а* — крепление при высоте корпуса 25 мм; *б* — то же при высоте 50 мм; *в* — верхнее крепление.

Для удобства монтажа в радиоаппаратуре металлобумажные конденсаторы в плоских корпусах выпускаются с различными типами крепления.

Типы крепления плоских корпусов приведены на рис. 30, *а* — корпуса высотой 25 мм, на рис. 30, *б* — корпуса высотой 50 мм. Некоторые типы конденсаторов, например МБГЧ, выпускаются также с верхним креплением (рис. 30, *в*). Такой тип крепления удобен, когда конденсатор помещается с одной стороны шасси аппарата, а присоединение выводов к схеме производится с другой стороны.

## § 15. Изоляторы металлобумажных конденсаторов

Наиболее сложным узлом при создании надежной защиты секций от воздействия влаги является изоляция выводов конденсатора. Эта проблема была решена, когда в промышленном масштабе был освоен выпуск стеклянных и керамических проходных изоляторов, разработанных на основе вакуумплотных соединений керамики с металлом и стекла с металлом. Выпускаемые промышленностью низковольтные стеклянные и керамические изоляторы приведены на рис. 31.

Основные размеры стеклянных изоляторов приведены в табл. 6. Эти типы изоляторов предназначены для впайвания их мягкими припоями, а поэтому могут применяться для конденсаторов, предназначенных для работы при температуре до  $+85^{\circ}\text{C}$ .

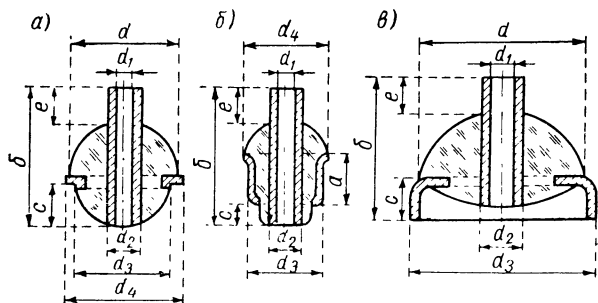
Таблица 6

Размеры стеклянных проходных изоляторов

| Обозначение<br>изолятора | $U_{\text{ном}},$<br>в | Размеры, мм |       |       |       |      |     |     |     |
|--------------------------|------------------------|-------------|-------|-------|-------|------|-----|-----|-----|
|                          |                        | $d_1$       | $d_2$ | $d_3$ | $d_4$ | $b$  | $a$ | $c$ | $e$ |
| ИСПШ-1-250               | 250                    | 1           | 1,6   | 3,6   | 6     | 6,3  | —   | 1,8 | 1,5 |
| ИСПШ-1,4-630-Б           | 630                    | 1,4         | 2     | 5,2   | 7     | 9,5  | —   | 2   | 2,5 |
| ИСПШ-1,4-1000-Б          | 1000                   | 1,4         | 2     | 7,2   | 10    | 10,5 | —   | 2,5 | 2,5 |
| ИСПШ-1,4-1600-Б          | 1600                   | 1,4         | 2     | 7,2   | 10    | 20   | —   | 5   | 2,5 |
| ИСШ-2,5-630-Б            | 630                    | 2,5         | 3     | 7,2   | 10    | 9    | —   | 2,5 | 2,5 |
| ИСШ-2,5-1000-Б           | 1000                   | 2,5         | 3     | 7,2   | 10    | 12   | —   | 3,5 | 2,5 |
| ИСШ-2,5-2000-Б           | 2000                   | 2,5         | 3     | 7,2   | 13    | 20,5 | —   | 9   | 2,5 |
| ИСЦ-1-250                | 250                    | 1           | 1,6   | 4,2   | 5     | 6,5  | 2   | 1   | 1,5 |
| ИСЦ-1,4-630              | 630                    | 1,4         | 2     | 6,2   | 7     | 7,5  | 2   | 1   | 2,5 |
| ИСЦ-1,4-1000             | 1000                   | 1,4         | 2     | 9,2   | 10    | 7,5  | 2   | 1   | 2,5 |
| ИСК-1,4-630-Б            | 630                    | 1,4         | 2     | 9,2   | —     | 7,5  | —   | 2   | 2,5 |
| ИСК-1,4-1000-Б           | 1000                   | 1,4         | 2     | 13    | —     | 7,5  | —   | 2   | 2,5 |
| ИСК-1,4-1000/1-Б         | 1000                   | 1,4         | 2     | 16    | —     | 7,5  | —   | 2   | 2,5 |

Недостатком стеклянных изоляторов по сравнению с керамическими является их более низкое значение поверхностного сопротивления в условиях высокой влажности. Поэтому, когда от конденсаторов требуется высокое сопротивление изоляции, отдается предпочтение керамическим изоляторам.

При изготовлении конденсаторов, предназначенных для работы при более высоких температурах, применяют



г)

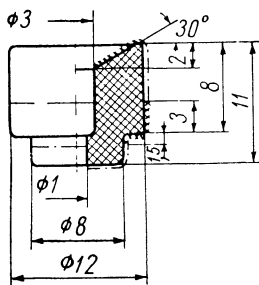
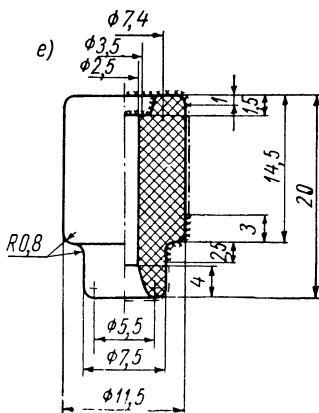
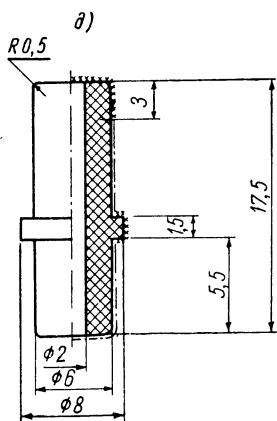


Рис. 31. Изоляторы для герметизированных металлобумажных конденсаторов с рабочей температурой до  $85^{\circ}\text{C}$ ; стеклянные изоляторы: а — ИСП; б — ИСЦ; в — ИСК; низковольтные керамические изоляторы: г — ИКП 1,5; д — ИКП 2—1; е — ИКП 3.



специальные «стеклокерамические» изоляторы, в которых соединение керамики с металлической арматурой изолятора осуществлено через переходный слой стекла (рис. 32). Этим изоляторам присвоено условное обозначение: ИКПТ (изоляторы керамические проходные теплостойкие). Изоляторы ИКПТ допускают припайку их твердыми припоями (латунь, медь и др.) (рис. 32, а) или приварку дуговой сваркой (рис. 32, б).

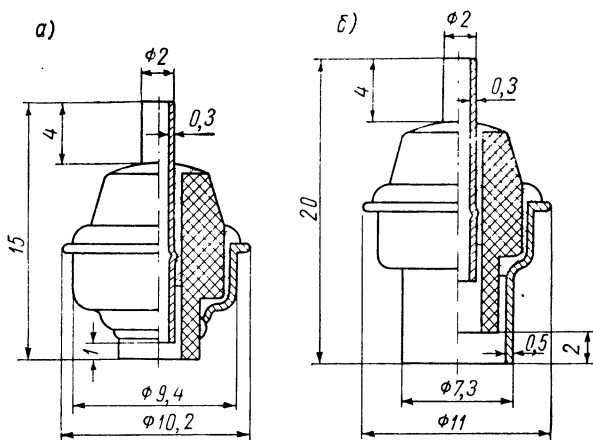


Рис. 32. Низковольтные стеклокерамические изоляторы: а — для пайки твердым припоем; б — для дуговой сварки.

Широкое распространение получают сейчас также изоляторы стеклопрессованного типа, получившие обозначение ИСПШ (рис. 33 и табл. 7). В этих изоляторах применена массивная арматура, причем стекло в широком интервале температур находится в сжатом состоянии, что обеспечивает устойчивость изолятора при тепловых ударах. Изоляторы ИСПШ-1 а предназначены для конденсаторов с лепестковым выводом, а изоляторы ИСПШ-1 б — для конденсаторов с проволочным выводом.

На рис. 34 приведена зависимость сопротивления изоляции от температуры для различных типов изоляторов, из которой видно, что при температурах выше  $100^{\circ}\text{C}$  могут быть использованы изоляторы ИКПТ и ИСПШ, позволяющие производить их впаивание высокотемпера-

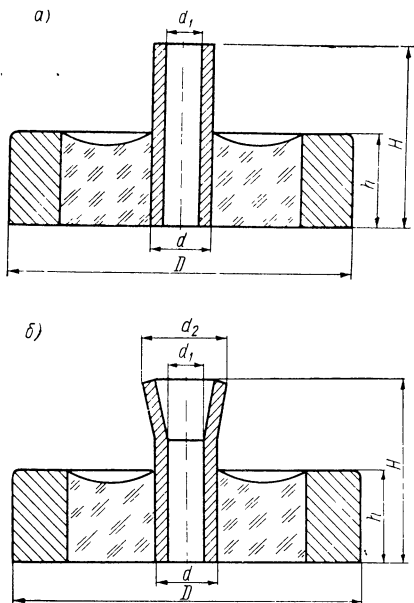


Рис. 33. Стеклопрессованные изоляторы: а — ИСПШ-1а; б — ИСПШ-1б.

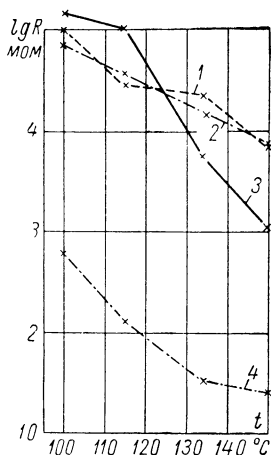


Рис. 34. Зависимость сопротивления изоляции проходных изоляторов от температуры:

1 — ИСПШ 1000 в; 2 — ИСПШ 600 в; 3 — ИКПТ, 4 — ИСШ 600 в (Торошчин).

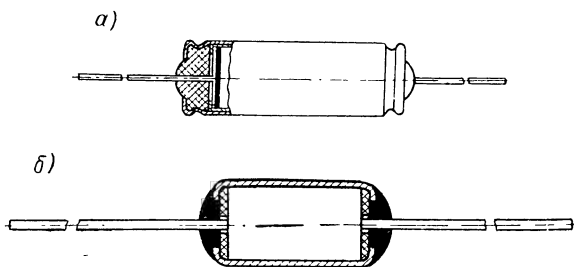


Рис. 35. Уплотненные металлобумажные конденсаторы: а — с резиновым уплотнением; б — с уплотнением эпоксидной смолой.

турными припоями и имеющие высокое сопротивление изоляции в интервале температур от  $+100$  до  $+155^{\circ}\text{C}$ .

В цилиндрических конденсаторах применяют также стеклянные, керамические, стеклокерамические и стеклопрессованные изоляторы. Кроме того, цилиндрические конденсаторы изготовляют с уплотнением из резины или эпоксидной смолы, которое одновременно служит также изоляцией вывода от корпуса (рис. 35).

Такое уплотнение, хотя и не дает вакуумплотного соединения с металлом корпуса и с выводным проводником, но достаточно надежно защищает конденсаторные секции от влаги, если условия эксплуатации не очень тяжелы. Хорошо изготовленные конденсаторы этого типа сохраняют свои параметры даже после достаточно длительного пребывания в условиях высокой влажности, хотя и не могут обеспечить в этих условиях такую же надежность, как конденсаторы с вакуумплотной герметизацией.

При использовании в качестве уплотнения эпоксидной смолы неперенным условием хорошей влагозащиты является тщательная очистка поверхностей металла, соприкасающихся со смолой, от масла и церезина.

Эпоксидное уплотнение нарушается при высоких температурах, поэтому максимальная температура применения конденсаторов, уплотненных эпоксидной смолой, не должна превышать  $70^{\circ}\text{C}$ .

Резиновые уплотнения допускают эксплуатацию при более высоких температурах. Так, конденсаторы МБМ,

Таблица 7

Размеры стеклопрессованных проходных изоляторов

| $U_{\text{ном}}, \text{в}$ | Размеры, мм |     |     |     |       |       |
|----------------------------|-------------|-----|-----|-----|-------|-------|
|                            | $D$         | $H$ | $h$ | $d$ | $d_1$ | $d_2$ |
| 125                        | 2,8         | 3,5 | 1,7 | 1,6 | 1     | 2     |
| 250                        | 3,5         | 3,5 | 2   | 1,6 | 1     | 2     |
| 250                        | 4,0         | 5   | 2   | 1,6 | 1     | 2     |
| 250                        | 4,5         | 5   | 2   | 1,6 | 1     | 2     |
| 400                        | 5,5         | 5   | 2   | 1,6 | 1     | 2     |
| 400                        | 6,0         | 5   | 2   | 1,6 | 1     | 2     |
| 400                        | 6,5         | 5   | 2   | 1,6 | 1     | 2     |
| 400                        | 7,5         | 5   | 2   | 1,6 | 1     | 2     |
| 630                        | 8,5         | 6   | 2,5 | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 630                        | 9,5         | 6   | 2,5 | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 630                        | 10,5        | 6   | 2,5 | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 1000                       | 11,5        | 6   | 3   | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 1000                       | 12,5        | 6   | 3   | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 1600                       | 13,5        | 6   | 3   | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 1600                       | 15,0        | 6   | 3   | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 1600                       | 17,0        | 6   | 3   | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 1600                       | 19,0        | 6   | 3   | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 1600                       | 21,0        | 6   | 3   | 2   | 1,4   | 2,5   |
| 1600                       | 23,0        | 6   | 3   | 2   | 1,4   | 2,5   |

уплотненные резиной марки № 8342, допускают эксплуатацию при температурах до  $100^{\circ}\text{C}$ . Применение более теплостойких резин, таких как 5Р-129, дает возможность использовать металлобумажные конденсаторы даже при  $125^{\circ}\text{C}$ .

Зарубежные фирмы выпускают, в основном, металлобумажные конденсаторы аналогичных конструкций. Некоторое различие существует лишь в системах крепления цилиндрических конденсаторов. Если нашей промышленностью цилиндрические конденсаторы обычно выпускаются без крепления, то, например, американская фирма «Спрэйг» выпускает металлобумажные конденсаторы в цилиндрических корпусах с 4—5 видами крепления.

По конструкции секций и их соединению металлобумажные конденсаторы разделяются на три основных типа:

1) конденсаторы с однослойным диэлектриком (однослойные); к ним относятся конденсаторы уменьшенных габаритов для облегченных условий эксплуатации;

2) конденсаторы с многослойным диэлектриком (многослойные), пропитанные церезином; к ним относятся конденсаторы для расширенного интервала рабочих температур;

3) конденсаторы с последовательным соединением секций, пропитанные вазелином; к ним относятся конденсаторы для цепей переменного тока.

Подробные сведения об этих типах конденсаторов приведены ниже, в главе пятой.

---

*ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ*

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
МЕТАЛЛОБУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

**§ 16. Схема технологического процесса изготовления  
металлобумажных конденсаторов**

Ознакомившись с конструкцией металлобумажных конденсаторов, можно перейти к рассмотрению технологии их изготовления.

Последовательность проведения отдельных операций при изготовлении металлобумажных конденсаторов может быть представлена в виде следующей схемы.

**Схема технологического процесса изготовления металлобумажных конденсаторов**



В дальнейшем изложении, описывая технологию изготовления металлобумажных конденсаторов, будем придерживаться этой схемы.

## § 17. Приготовление лака

Бумага, используемая в металлобумажных конденсаторах для нанесения на нее обкладок, предварительно покрывается лаком (см. § 10). В нашей промышленности широкое распространение получил этилцеллюлозный лак с содержанием этилцеллюлозы от 5 до 7%; в качестве растворителя применяется смесь бензола (80%) и этилового спирта ректификата (20%) или смесь толуола (60%) и этилового спирта ректификата (40%).

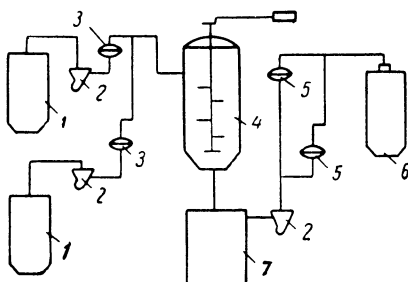


Рис. 36. Схема технологического процесса приготовления лака (пояснения в тексте).

Для приготовления лака используется этилцеллюлоза марки «К», предназначенная для радиодеталей (ТУ МХП 2732-54).

Схема технологического процесса приготовления лака показана на рис. 36. В соответствии с составленной рецептурой в смеситель 4 загружается этилцеллюлоза и растворители. Одновременно для придания окраски лаку добавляют растворенный в спирте метилвиолет из расчета 0,2 г на 1 кг лака. Растворение этилцеллюлозы проводится при температуре 35—45° С при постоянном перемешивании в течение 6 часов, после чего лак сливается в резервуар 7 и фильтруется при помощи фильтр-пресса 5 под давлением 2—3 атм азота.

Растворители, поступающие из резервуара 1 в смеситель, также подвергаются фильтрации с целью отделения

от механических загрязнений. В качестве фильтрующего материала для фильтрации растворителей в фильтре 3 применяются 2—3 слоя марли, а для фильтрации лака в фильтре 5 один слой капронового полотна, два слоя марли и слой ваты толщиной 4—5 мм. Приготовленный лак хранится в резервуаре 6. Готовый лак должен иметь вязкость 30—65 сек по воронке ВЗ-4 при температуре  $20 \pm 2^\circ \text{C}$ . Перекачка лака и растворителей производится насосами 2.

## § 18. Лакирование бумаги

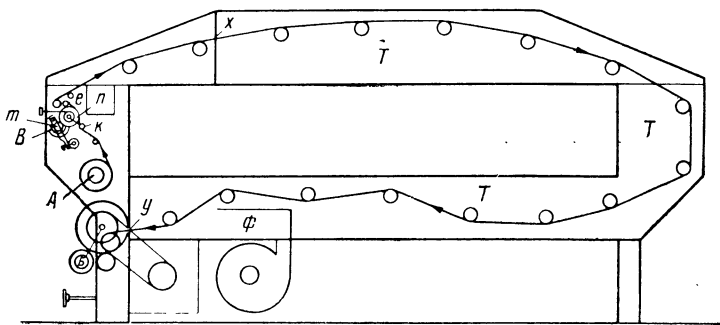


Рис. 37. Схема машины для лакирования бумаги (пояснения в тексте).

Бумага, переходя с валика  $k$  на валике, касается поверхности валика  $n$  и таким образом покрывается лаком.

Изменением расстояния между валиками  $m$  и  $n$  удастся изменять толщину слоя лака на валике  $n$ , а следовательно, и толщину слоя лака, наносимого на бумагу.

Бумага, покрытая лаком, поступает в сушильную камеру. Т. Последняя отделена от остального рабочего пространства машины металлическими перегородками  $x$  и  $y$  с узкими щелями, служащими для прохождения бумаги.

Таблица 8

**Влияние лакировки на электрические характеристики бумаги**

| Наименование характеристик                                                                                          | Нелакированная бумага | Лакированная бумага |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Число проводящих включений на $1 \text{ м}^2$ бумаги толщиной $8 \text{ мк}$ с приложением при подсчете напряжения: |                       |                     |
| а) $50 \text{ в}$ . . . . .                                                                                         | 825                   | 21                  |
| б) $250 \text{ в}$ . . . . .                                                                                        | 3020                  | 103                 |
| Электрическая прочность в один слой, $\text{кв/мм}$ . . . . .                                                       | 34,8                  | 56,7                |

Обогрев сушильной камеры обычно осуществляют паром, для чего в нижней части сушильной камеры прокладываются трубы, а для подогрева поступающего в камеру воздуха установлен калорифер  $\Phi$ .

Лакирование бумаги производят с одной стороны; в тех случаях, когда для изготовления конденсаторов требуется двухсторонне-лакированная бумага, ее приходится лакировать дважды, раздельно с каждой стороны.

Для получения плотной намотки рулона лакированной бумаги и равномерности распределения лака по поверхности бумажной ленты края этой ленты на ширине  $2\text{—}5 \text{ мм}$  не лакируют, а в процессе дальнейшей обработки обрезают.

Попытки нанесения лака на всю ширину ленты бумаги обычно приводят к попаданию его у краев ленты на обратную сторону бумаги; это вызывает утолщение краев лакированной ленты и в дальнейшем приводит к надрывам кромки бумаги.

Температура в сушильной камере устанавливается в зависимости от используемого лака обычно от  $70\text{—}80^\circ \text{С}$  в начале камеры, до  $100\text{—}120^\circ \text{С}$  в конце.

Скорость движения бумаги поддерживается в пределах  $0,25\text{—}0,35 \text{ м/сек}$ . Увеличение скорости движения бумаги

с одновременным повышением температуры в сушильной камере приводит к снижению качества лакового покрытия и значительной деформации бумаги.

Толщину слоя лака, наносимого на бумагу, можно изменять в пределах от 0,8 до 1,4 мк.

Лак не только располагается на поверхности бумаги, но также и пропитывает ее до некоторой степени. Поэтому лакирование значительно изменяет электрические и механические свойства конденсаторной бумаги.

Сравнение основных характеристик лакированной и нелакированной бумаги приведено в табл. 8.

Как видно из приведенной таблицы, лакирование бумаги заметно улучшает электрическую прочность бумаги и снижает число проводящих включений, за счет того, что лак заполняет пустоты в бумаге и изолирует значительную часть проводящих включений и сквозных отверстий.

## § 19. Резка бумаги

Конденсаторная бумага после лакирования, а также после металлизации разрезается на ленты с такими значениями ширины, которые необходимы для дальнейшей технологической обработки.

В СССР выпускают специальные бумагорезательные машины типа БРК-15, позволяющие разрезать бумажную ленту шириной до 15 см с производительностью 25—30 кг в смену, и типа БРК-50 для резки бумаги с большей шириной лент, до 50 см, с производительностью до 80—90 кг в смену (рис. 38).

Резка бумаги производится дисковыми ножами (рис. 39), один из которых (нижний) жестко закрепляется на валу, а второй (верхний) эластично прижимается к первому.

Перекрытие режущих кромок ножей должно составлять от 1,5 до 2 мм. Меньшее перекрытие может вызвать деформацию острия верхнего ножа, а при наличии биения на одном из валов, может даже привести к выходу верхнего ножа на вал нижних ножей.

Более глубокое перекрытие режущих кромок ножей увеличивает трение между ними и требует применения значительных усилий для вращения валов с ножами. Для того чтобы все ножи, установленные на валах бумагорезательной машины, имели одинаковое перекрытие,

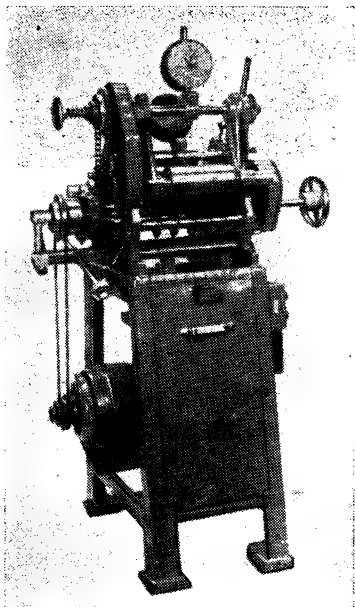


Рис. 38. Машина для резки конденсаторной бумаги типа БРК-15.

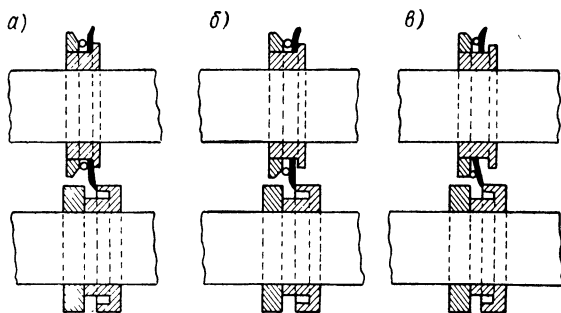


Рис. 39. Дисковые ножи для резки бумаги: *а* — слишком мало зажатый нож; *б* — правильно зажатый нож; *в* — слишком сильно зажатый нож.

набор ножей должен образовать сплошной вал с одинаковым диаметром по всей длине; все верхние ножи также должны быть равного диаметра. При заточке верхних ножей должен обрабатываться сразу весь комплект до одинакового диаметра.

После установки нужного количества ножей на заданном расстоянии они закрепляются и производится перемещение верхнего вала с ножами вдоль его оси для прижатия режущих кромок. О степени этого прижатия можно судить по величине зазора между ножом и крепежной муфтой. В свободном состоянии нож плотно прижат к муфте пружинной.

Слабое прижатие ножей может не давать сплошного разреза, а слишком сильное прижатие приводит к быстрому износу ножей и увеличивает трение. Последнее вызывает повышенную механическую нагрузку на бумагу и при малой толщине бумаги будет вызывать частые обрывы.

Станки БРК-15 и БРК-50 при хорошей настройке позволяют производить резку очень тонкой конденсаторной бумаги (4—5 *мк*).

## § 20. Сушка бумаги перед металлизацией

Металлизация бумаги цинком производится при остаточном давлении порядка 0,01 *мм* рт. ст. В процессе металлизации происходит также разогрев бумаги. В таких условиях бумага может выделять большое количество газов, основную часть которых будут составлять водяные пары.

С целью улучшения условий металлизации бумага подвергается предварительной сушке. Для этой цели применяют различные технологические режимы сушки (табл. 9). Как видно из таблицы, на сушку бумаги затрачивается значительное время.

Воздушная сушка производится в обыкновенных сушильных шкафах, иногда оборудованных принудительной циркуляцией воздуха.

Вакуумная сушка производится в специальных баках (рис. 40). Такие же баки обычно используются для сушки и пропитки конденсаторных секций. Для откачки воздуха применяются ротационные масляные насосы. В табл. 10 приведены характеристики таких вакуумных насосов, выпускаемых нашей промышленностью.

## Режимы сушки бумаги

| Страна и фирма                      | Воздушная сушка      |          | Вакуумная сушка      |          |
|-------------------------------------|----------------------|----------|----------------------|----------|
|                                     | темпера-<br>тура, °C | время, ч | темпера-<br>тура, °C | время, ч |
| ФРГ, Фирма «Сименс» . . . . .       | 95—5                 | 80—100   | —                    | —        |
| ФРГ, Фирма «Бош» . . . . .          | 100                  | 100      | 110                  | 24       |
| СССР, при ширине до 50 мм . . .     | 110±5                | 48       | 110±5                | 16       |
| СССР, при ширине от 50 до 74 мм . . | 110±5                | 80       | 110±5                | 30       |
| СССР, при ширине от 74 до 120 мм .  | 110±5                | 120      | 110±5                | 48       |

Таблица 10

## Характеристики ротационных насосов

| Характеристика                                                    | ВН-461                    | РВН-20             | ВН-2               | ВН-1               | ВН-4               | ВН-6               |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                                                   | Тип                       |                    |                    |                    |                    |                    |
|                                                                   | Пластинчато-<br>статорный |                    | Золотниковый       |                    |                    |                    |
| Быстрота откачки при давлении 760 мм рт. ст., л/сек . . . . .     | 0,83                      | 3,3                | 7                  | 18,3               | 59                 | 155                |
| Число оборотов ротора насоса в минуту . . . . .                   | 540                       | 400                | 525                | 500                | 500                | 360                |
| Предельная разреженность, достигаемая насосом: мм рт. ст. . . . . | 1·10 <sup>-3</sup>        | 1·10 <sup>-3</sup> | 3·10 <sup>-3</sup> | 3·10 <sup>-3</sup> | 5·10 <sup>-3</sup> | 1·10 <sup>-2</sup> |
| Количество масла, л . . . . .                                     | 2,3                       | 0,5                | 2                  | 3,8                | 16                 | 55                 |
| Охлаждение насоса . . . . .                                       | Воздушное                 |                    |                    | Водяное            |                    |                    |
| Размеры, мм                                                       |                           |                    |                    |                    |                    |                    |
| высота . . . . .                                                  | 415                       | 445                | 490                | 605                | 1420               | 1975               |
| длина . . . . .                                                   | 610                       | 525                | 690                | 910                | 1635               | 1905               |
| ширина . . . . .                                                  | 294                       | 330                | 560                | 625                | 875                | 960                |
| Вес, кг . . . . .                                                 | 75                        | 110                | 180                | 312                | 1050               | 2052               |
| Мощность электродвигателя, квт                                    | 0,6                       | 0,8                | 1,7                | 2,8                | 7                  | 20                 |

В зависимости от размера бака и степени его предполагаемой загрузки устанавливается насос нужной производительности.

При сушке бумаги выделяется значительное количество влаги, которая может сконденсироваться в насосе, что приведет к увлажнению масла и разрушению металлических деталей насоса.

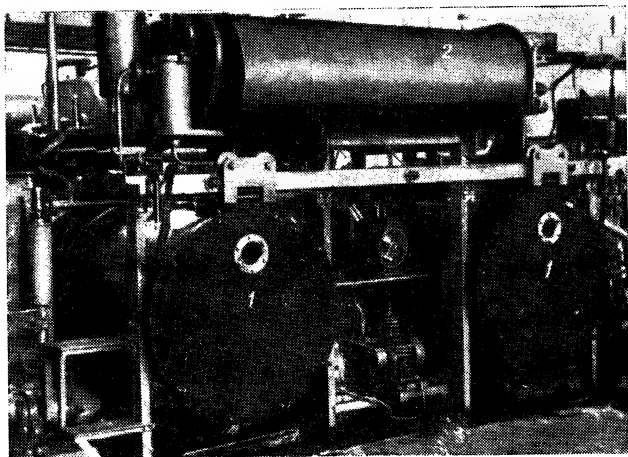


Рис. 40. Вакуумная установка для сушки конденсаторной бумаги и пропитки намотанных секций

1 — баки для сушки бумаги и конденсаторных секций; 2 — бак для обезгаживания пропитываемого состава и его хранения перед пропиткой.

Поэтому при конструировании вакуумных установок для сушки бумаги принимаются специальные меры для того, чтобы не допустить конденсации влаги в насосе. Наибольшее распространение для этой цели получили следующие мероприятия:

1. Ротационный насос снабжают газобалластным устройством, которое в процессе откачки газов впускает воздух в камеру насоса в таком количестве, что откачиваемые пары при сжатии не достигают высокого насыщения, поэтому не конденсируются и выкидываются в атмосферу в виде пара. Однако при этом снижается производительность насоса, а также ухудшается предельное разрежение.

2. На пути следования откачиваемых газов устанавливается холодильная ловушка, защищающая насос от проникновения в него основной части выделяемых из бумаги паров воды. Холодильная ловушка представляет собой змеевик или радиатор, по трубкам которого протекает охлаждающее вещество, подаваемое компрессором холодильной установки. Температура внутри таких холодильных ловушек, работающих на фреоне 12 или 22,

Таблица 11

Зависимость давления  
насыщенного пара  
от температуры

| Температура,<br>°C | Давление,<br>мм рт. ст. | Температура,<br>°C | Давление,<br>мм рт. ст. |
|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|
| 0                  | 4,579                   | —35                | 0,167                   |
| —5                 | 3,008                   | —40                | 0,093                   |
| —10                | 1,941                   | —45                | 0,052                   |
| —15                | 1,238                   | —50                | 0,029                   |
| —20                | 0,772                   | —55                | 0,015                   |
| —25                | 0,471                   | —60                | 0,007                   |
| —30                | 0,280                   | —65                | 0,002                   |

обычно лежит на 40—60° C ниже нуля. Откачиваемые газы проходят через холодильную ловушку, где и конденсируются водяные пары. При хорошем охлаждении откачиваемых газов удастся достаточно полно сконденсировать водяные пары в холодильной ловушке и избежать конденсации влаги в насосе.

Давление насыщенного пара при различных температурах приведено в табл. 11.

Из этой таблицы видно, что при снижении температуры откачиваемых газов от 0 до —40° C, давление водя-

ных паров, а следовательно, и количество влаги, попадающей в насос, может быть снижено примерно в 50 раз.

С целью удаления сконденсировавшихся в холодильной ловушке водяных паров, находящихся там в твердом состоянии, ловушки снабжаются электрическим обогревом, который включается после окончания цикла сушки и отключения насосов.

Для того чтобы правильно оценить тот или иной метод сушки бумаги, рассмотрим факторы, влияющие на скорость и качество сушки.

Основными факторами, определяющими качество сушки, являются:

- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- барометрическое давление.

Указанные три параметра характеризуют режим сушки и определяют остаточную влажность материала.

Для получения более полного удаления влаги можно прибегать к форсированию процесса сушки путем соответствующего изменения любого из этих параметров, если только это не приводит к разрушению обрабатываемого материала.

При сушке бумаги не удастся получить таких условий, при которых бумага совершенно не содержала бы адсорбированной воды, без разрушения структуры бумаги.

• Поэтому за бумагу с нулевой влажностью будем условно

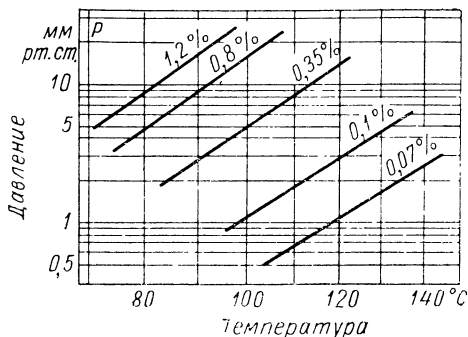


Рис. 41. Зависимость давления водяных паров от температуры при различной влажности бумаги (Фут).

принимать такую бумагу, которая выдержана при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  и остаточном давлении воздуха  $0,01$  мм рт. ст. до равновесного состояния. Такая бумага не выделяет значительного количества газов при металлизации.

Зависимость давления водяных паров от температуры при различной влажности бумаги приведена на рис. 41. Как видно из этого рисунка, при сушке бумаги под вакуумом можно обеспечить хорошее удаление влаги, не прибегая к воздействию чрезмерно высокой температуры.

Бумага, подготавливаемая к металлизации, проходит сушку в виде плотно намотанных рулонов. В этом случае в процессе сушки следует рассматривать два явления:

а) непосредственное испарение влаги с поверхности рулона;

б) перемещение влаги из внутренних областей рулона к поверхности.

Первый процесс — непосредственное испарение с влажной поверхности протекает достаточно быстро; скорость

второго процесса определяется влагонепроводностью материала, и этот процесс протекает длительное время.

Влагонепроводностью материала называют перемещение влаги, вызванное наличием градиента влажности.

Закон влагонепроводности можно написать в виде:

$$i = -k\gamma_0 \frac{\partial U}{\partial n} = k\gamma_0 \Delta U, \quad (25)$$

где  $k$  — коэффициент влагонепроводности;

$\gamma_0$  — вес абсолютно сухого тела в единице объема влажного тела;

$\frac{\partial U}{\partial n}$  — градиент влажности.

Коэффициент влагонепроводности зависит от влажности материала. При большой влажности материала влага перемещается в виде жидкости. С уменьшением влажности количество влаги, перемещающейся в виде жидкости, уменьшается и часть влаги перемещается в виде пара. При малых значениях влажности перемещение влаги в основном происходит в виде пара.

Вышеприведенный закон влагонепроводности справедлив при постоянстве температуры во всем объеме исследуемого материала. Практически сушка происходит одновременно с нагреванием материала, и тепловой поток обычно направлен против потока влаги.

Тепловой поток пропорционален температурному градиенту:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (26)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;

$\frac{\partial t}{\partial n}$  — температурный градиент.

Величина коэффициента теплопроводности характеризуется количеством тепла ( $\text{ккал}$ ), проходящего через  $1 \text{ м}^2$  поверхности за  $1 \text{ ч}$  при падении температуры в  $1 \text{ град/м}$ .

Коэффициент теплопроводности в процессе сушки не остается постоянным, а снижается с уменьшением влажности.

Для просушивания материала при заданном режиме сушки необходимо не только нагреть обрабатываемый материал до заданной температуры, но и выдержать его при ней некоторое время для получения равномерного

распределения температуры и установления равновесного состояния между влажностью материала и окружающей среды.

Если процесс сушки ведется при высоком барометрическом давлении, то этим обеспечивается быстрый подвод тепла и медленное удаление влаги. Требуется длительное время для отвода влаги из внутренних витков рулона бумаги. Кроме того, при высоком барометрическом давлении и при заданной температуре остаточная влажность материала велика.

Если процесс сушки ведется при малом барометрическом давлении, то это затрудняет подвод тепла и при большем разрежении теплопередача к обрабатываемому материалу осуществляется главным образом излучением. Вместе с тем малое давление окружающих газов, в особенности при непрерывной их откачке, способствует быстрому удалению паров воды и обеспечивает получение низкой остаточной влажности при заданной температуре.

Опыты, проведенные на рулонах бумаги шириной 74 мм и диаметром 200 мм при температуре 100° С, показали (рис. 42), что прогрев рулонов при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. и естественной циркуляции воздуха в термостате происходит за 3 часа; при давлении 0,1 мм рт. ст. после 30 часов прогрева разность температур между средней точкой рулона и стенкой вакуумного бачка еще составляла 30° С.

Изменение влажности рулона бумаги, подвергавшегося сушке при атмосферном давлении 760 мм рт. ст., показано на рис. 43. Остаточная влажность после 80 часов сушки составляла около 2,5%.

Рулон бумаги, проходящий сушку под вакуумом (остаточное давление 0,1 мм рт. ст.), в процессе сушки не

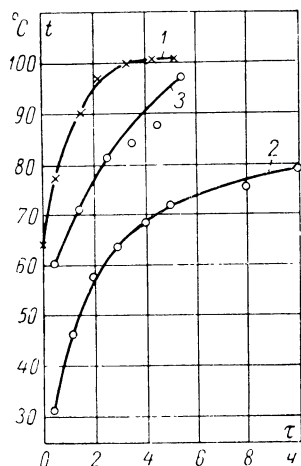


Рис. 42. Изменение температуры внутри рулона бумаги в зависимости от времени сушки при различных методах сушки

1 — сушка при атмосферном давлении; 2 — сушка под вакуумом (остаточное давление 0,001 атм); 3 — комбинированная сушка (горячий воздух при 6 атм, потом — вакуум) (Торошин).

взвешивался и поэтому не представляется возможным показать зависимость влажности от времени сушки. При этом варианте сушки удаление паров воды было облегчено благодаря малому остаточному давлению газов и постоянной их откачке в процессе сушки. После 30 часов сушки остаточная влажность не превышала 0,2%.

Из изложенного вытекает, что метод сушки бумаги при полном атмосферном давлении не может дать каче-

ственной подготовки бумаги для металлизации. Вакуумная сушка обеспечивает хорошую подготовку бумаги для металлизации, но имеет тот существенный недостаток, что для проведения ее требуется значительное время вследствие медленного подвода тепла к обрабатываемому рулону.

Описанные выше опыты проводились в процессе сушки одного рулона в вакуумной бачке; в производственных условиях производится одновременная сушка большого количества рулонов и в этом случае средние рулоны

оказываются заэкранированными крайними рулонами и процесс теплопередачи протекает еще медленнее. С целью ускорения процесса сушки разрабатываются новые методы, из которых остановимся на следующих:

1. Высокочастотная сушка при полном атмосферном давлении. Подготовленные для сушки рулоны бумаги помещают в поле высокой частоты. За счет высоких диэлектрических потерь влажной бумаги происходит быстрый разогрев рулонов. Данный метод только ускоряет процесс нагрева, но не может обеспечить достаточно полного удаления влаги, поскольку сушка происходит при полном атмосферном давлении. Сушка в таких условиях, как указывалось выше, дает значение остаточной влажности порядка 3—4%.

2. Комбинированная сушка сухим воздухом с последующей откачкой. По этому методу в шкаф с загружен-

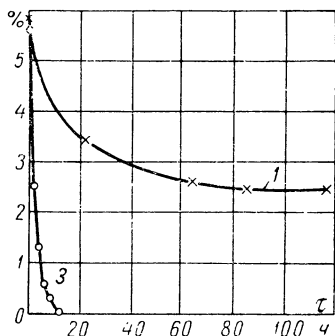


Рис. 43. Изменение влажности рулона конденсаторной бумаги в зависимости от времени сушки при различных методах сушки (обозначения кривых, как на рис. 42) (Торошин).

ными в него рулонами впускается предварительно высушенный и нагретый воздух под давлением в несколько атмосфер. По истечении некоторого промежутка времени, когда воздух передает часть своего тепла обрабатываемым рулонам, его откачивают из шкафа. Когда будет достигнуто достаточно полное удаление образовавшихся паров воды, то снова в шкаф подается сухой горячий воздух. После нескольких таких циклов рулоны хорошо высушаются, поскольку давление водяных паров за все время обработки остается очень низким, а благодаря высокому давлению воздуха происходит быстрый подвод тепла. Процесс заканчивается длительной откачкой с подогревом бачка как и при вакуумной сушке.

Данный метод значительно ускоряет время прогрева рулонов, обеспечивая в то же время низкую остаточную влажность, как при обычной вакуумной сушке (см. рис. 42 и 43 выше).

3. Комбинированная сушка высокой частотой с последующей откачкой. Некоторые предприятия применили для сушки рулонов бумаги высокочастотный подогрев с последующей сушкой под вакуумом, что обеспечило значительное ускорение процесса сушки при высоком качестве подготовки бумаги к металлизации, т. е. при малом остаточном содержании влаги.

Исследование процесса сушки бумаги, применяемой в производстве металлобумажных конденсаторов провел японский исследователь Сайто Нобору. Он изучал образцы конденсаторной бумаги с весом квадратного метра 8 и 13 г, а также такую же бумагу, покрытую ацетилцеллюлозным лаком.

Исследовалась потеря в весе образцов с помощью торсионных весов при их прогреве при температурах 60, 100, 155 и 163° С и последующем охлаждении до 23° С. Было установлено, что потеря в весе для туго намотанных образцов меньше, чем для слабо намотанных.

Газовыделение из бумаги, нагреваемой на воздухе, складывается из удаления адсорбированных газов (в основном паров воды) и из выделения продуктов разложения целлюлозы (смесь  $H_2O$  и  $CO_2$ ). Газовыделение из бумаги, нагреваемой в вакууме, имеет такой же характер: в пределах от 20 до 180° С быстро выделяется адсорбированный газ, также представляющий собой пары  $H_2O$ , а газообразные продукты разложения целлюлозы содержат,

кроме  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , также и  $\text{CO}$ . Скорость выделения адсорбированных газов характеризуется уравнением:

$$V = Q \exp(-k\tau), \quad (27)$$

где  $Q$  — общее количество адсорбированного вещества;  
 $\tau$  — время нагрева;

$$k = 7,8 \cdot 10^{16} \exp(-8600/RT),$$

здесь  $R$  — газовая постоянная;

$T$  — абсолютная температура.

При выделении адсорбированных паров воды энергия активации, равная 8600 кал/моль, близка к скрытой теплоте испарения воды, которая равняется 9702 кал/моль.

Скорость выделения продуктов разложения целлюлозы характеризуется постоянной газовой выделения:

$$k = 1,8 \cdot 10^{16} \exp(-44300/RT).$$

При испытании образцов, покрытых ацетилцеллюлозным лаком, состав продуктов разложения был значительно сложнее; масс-спектрометр показал наличие ряда газов, природу которых установить не удалось.

Результаты этих исследований показывают, что к вопросу о выборе температуры сушки бумаги надо подходить с осторожностью, так как даже при относительно не очень высоких температурах и в условиях вакуума, наряду с удалением воды, адсорбированной бумагой, начинает идти и процесс разложения самой бумаги и лаковой пленки, который может привести к ухудшению их свойств.

## § 21. Металлизация бумаги

### Оборудование для металлизации

Нанесение металла на бумагу осуществляется на специальных установках, позволяющих производить испарение металла под вакуумом и конденсацию его на поверхности движущейся ленты бумаги.

На рис. 44 приведена схема установки для металлизации бумаги цинком.

Для удобства рассмотрения установку для металлизации бумаги можно разделить на следующие основные узлы:

- 1) вакуумный колокол;
- 2) механизм для откачки газов;

- 3) механизм для перемотки бумаги;
- 4) механизм для испарения металла.

Вакуумный колокол 1 представляет собой металлический сосуд из стали толщиной 5—7 мм (в некоторых типах машин колокол располагается в горизонтальном по-

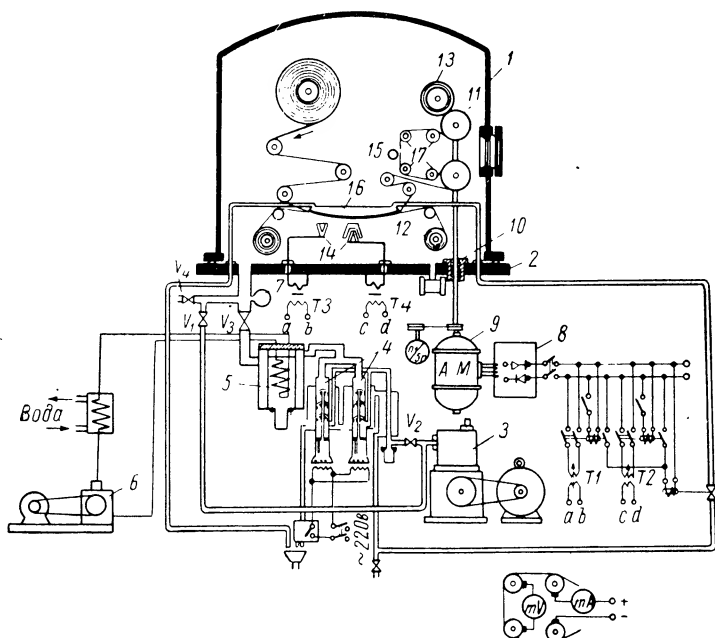


Рис. 44. Схема установки для металлизации бумаги цинком (по-  
яснения в тексте).

ложении). Колокол вмещает все детали, необходимые для испарения металла и перемотки бумаги, изолируя их от атмосферы.

Для наблюдения за процессом металлизации в стенки колокола вмонтированы смотровые стекла.

Уплотнение между колоколом и плитой 2 достигается с помощью резиновой прокладки, заложенной в канавке нижней кромки колокола.

Механизм для откачки газов состоит из ротационного форвакуумного насоса 3, пароструйного насоса 4 и ловушки водяных паров 5.

В качестве ротационных насосов на машины металлизации бумаги цинком обычно устанавливают насосы БН-1, а в качестве пароструйных — паромасляные бустерные насосы типа БН-3 (характеристики насосов приведены в табл. 10 и 12).

Таблица 12

**Характеристики паромасляных насосов**

| Характеристики                                                                        | Бустерные насосы  |                   | Высоковакуумные насосы              |                   |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                                                                                       | БН-3              | БНМ-1500          | Н-2Т                                | Н-5Т              | Н-8Т              |
| Средняя скорость откачки воздуха, л/сек . . . . .                                     | 450               | 1500              | 2000                                | 4500              | 8000              |
| При давлении, мм рт. ст. . . . .                                                      | $1 \cdot 10^{-2}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ | $2 \cdot 10^{-4} — 1 \cdot 10^{-5}$ |                   |                   |
| Внутренний диаметр корпуса, мм                                                        | 160               |                   | 260                                 | 380               | 500               |
| Предельный вакуум, достигаемый насосом без вымораживающей ловушки, мм рт. ст. . . . . | $5 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-6}$                   | $3 \cdot 10^{-6}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ |
| Максимальное выпускное давление, мм рт. ст.                                           | 0,3—0,6           | 1,5               | 0,075                               | 0,1               | 0,1               |
| Количество рабочей жидкости, л                                                        | 1,5               | 4                 | 1                                   | 1,5               | 4                 |
| Мощность нагревателя, кВт . . . . .                                                   | 3,5               | 14                | 1,5                                 | 2,0               | 2,8               |
| Высота, мм . . . . .                                                                  | 610               | 1310              | 615                                 | 776               | 1012              |
| Площадь в плане, мм . . . . .                                                         | $413 \times 413$  | $790 \times 660$  | $432 \times 370$                    | $596 \times 532$  | $779 \times 650$  |
| Вес, кг . . . . .                                                                     | 33,5              | 150               | 41                                  | 79                | 140               |

Ловушка водяных паров представляет сосуд объемом 40—50 л. Снаружи сосуд покрыт теплоизоляцией, а внутри него помещен змеевик, по которому протекает охлаждающее вещество от холодильной машины 6. Хладагент испаряется в змеевике и поглощает тепло из окружающего пространства, в том числе и от откачиваемых газов. Последние охлаждаются, а водяные пары конденсируются на поверхности змеевика. Холодильные машины, работающие с одноступенчатым компрессором 2ФВ-5, обеспе-

чивают получение температуры в ловушке минус 35—40° С.

После такого вымораживания откачиваемые газы содержат незначительное количество влаги и она уже не может сконденсироваться в насосах.

Предварительное разрежение под колоколом проводится при закрытых кранах  $V_2$  и  $V_3$  и открытом кране  $V_1$

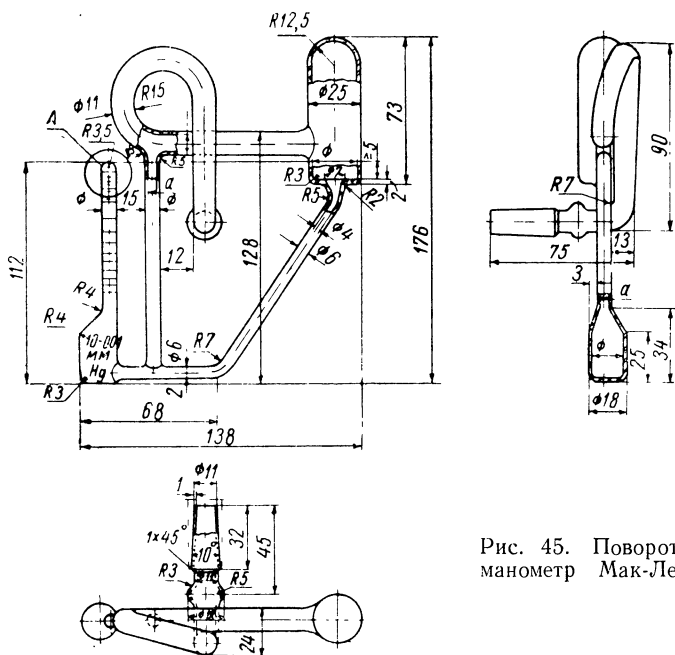


Рис. 45. Поворотный манометр Мак-Леода.

с помощью одного ротационного насоса. После получения остаточного давления менее 0,3 мм рт. ст. открываются краны  $V_2$  и  $V_3$  и закрывается кран  $V_1$ , этим последовательно с форвакуумным насосом подключается пароструйный насос.

Процесс металлизации цинком проводится при остаточном давлении не выше 0,15 мм рт. ст.

Контроль за остаточным давлением под колоколом ведется с помощью компрессионного манометра Мак-Леода или термпарного вакуумметра ВТ-2. Общий вид поворотного манометра Мак-Леода приведен на рис. 45.

Принцип действия данного манометра основан на предварительном сжатии газов, отделенных от контролируемого объема, с последующим измерением давления у этих газов.

Показания манометра Мак-Леода для постоянных газов (водород, гелий, аргон, кислород, азот) можно считать наиболее правильными, и в этом случае манометр данного типа обеспечивает высокую точность измерения. Если же измеряется давление газов, содержащих пары воды или масла, то манометр Мак-Леода может дать значительную погрешность, так как эти пары при увеличении давления в процессе измерения легко конденсируются на стенках капилляра, что вызывает существенную погрешность получаемых результатов.

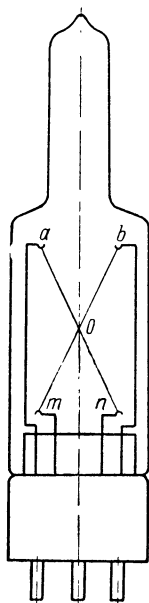


Рис. 46. Схема термоэлемента к термопарному вакуумметру.

Принцип действия термопарного вакуумметра основан на снижении теплопроводности газов с понижением давления. На рис. 46 приведена схема термоэлемента, используемого в этом вакуумметре. Если через нить  $a-o-b$  пропускать ток, постоянный по силе, то температура нити будет изменяться в зависимости от давления окружающих газов. Термопарой  $m-o-n$  измеряется температура нити  $a-o-b$ .

Приборы ВТ позволяют измерять остаточное давление от 1 до  $1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.

Градуировочные кривые для датчиков (лампы ЛТ-2 и ЛТ-4) даются по сухому воздуху.

Для расширения интервала измеряемых давлений в сторону более низких значений термопарный вакуумметр дополняют ионизационным. Примером такого комбинированного вакуумметра является ВИТ-1А, позволяющий производить измерения давления от 1 до  $5 \cdot 10^{-8}$  мм рт. ст.

Механизм для перемотки бумаги состоит из выпрямителя 8, мотора постоянного тока 9, вакуумного ввода вращающего вала 10 и передачи на вал перемотки бумаги 11 (см. рис. 44).

С целью регулирования в широких пределах скорости движения бумаги механизм перемотки оборудован мо-

тором постоянного тока, питание мотора осуществляется от выпрямителя, собранного в пульте управления.

Вакуумный вращающийся ввод уплотнен резиновыми кольцами и заливается густым маслом типа вискозин. Передача на ведущий вал перемотки бумаги осуществлена с помощью конических шестерен, а приемный вал с рулоном бумаги снабжен фрикционом и цепной передачей. Во время перемотки бумаги рулон 13 катится по ведущему валу, а цепная передача с фрикционом на приемном валу обеспечивают плотную намотку рулона.

С ведущего вала перемотки бумаги имеется также ременная передача на вал перемотки бумажных экранов 12. Для снижения скорости движения экранов установлена система шестерен с общим передаточным числом 1/40.

В некоторых типах металлизационных установок неметаллизированные полосы (закраины) создаются не путем экранирования, а путем обработки бумаги парами масла. Такие установки снабжаются механизмом для подачи и испарения масла, а также набором валиков, обеспечивающих получение пропитанных маслом полос в заданных участках бумажной ленты. Металл не конденсируется на пропитанной маслом бумаге, и такие полосы остаются не покрытыми металлом.

Для контроля за скоростью движения бумаги металлизационные установки снабжаются тахометрами, показывающими скорость вращения ведущего вала намотки бумаги.

Механизм для испарения металла состоит из регулирующих трансформаторов  $T_1$  и  $T_2$ , понижающих трансформаторов  $T_3$  и  $T_4$ , изолированных вводов 7 и испарительных печей 14 (см. рис. 44). Конструкция печей показана на рис. 47.

Как указывалось в первой главе, при нанесении металлов с низкой температурой кипения, таких как цинк или кадмий, необходимо предварительно наносить на диэлектрик тонкий подслой металла с высокой температурой кипения. При металлизации бумаги цинком предварительно наносят олово или серебро. Температура испарителя олова поддерживается равной 1100—1200° С, а испарителя цинка 450—500° С.

Пользуясь регулировочными трансформаторами, можно изменять температуру печей, а следовательно, и интенсивность испарения металлов.

При использовании для металлизации бумаги металлов с высокой температурой кипения, например алюминия, отпадает необходимость установки двух печей и монтажа двух линий питания, так как в этом случае не требуется создания подслоя из другого металла.

Контроль за толщиной металлического покрытия на бумаге проводится с помощью измерения его электропроводности, для чего бумага в процессе металлизации проходит через измерительные валики 17. Контроль за равномерностью металлического покрытия по ширине бумаги ведется визуально «на просвет», для чего позади бумажной ленты установлена лампочка 15 (см. рис. 44).

Во избежание перегрева, бумага над печами проходит, касаясь охлаждаемой водой подушки 16, которая также защищает обратную сторону бумаги от конденсации на ней металла. Ширина подушки должна быть на 1—2 мм меньше ширины бумаги; в противном случае цинк будет конденсироваться на краях подушки, не закрытых бумажной лентой; незначительное смещение

бумажной ленты, приводящее к зацеплению ее краев с осажденным на подушке цинком, сможет вызвать обрыв бумаги.

Если же бумага на 0,5—1 мм выходит за края подушки, то металл конденсируется не только на поверхности бумаги, обращенной к испарителю, но и на торце бумажной ленты, а также с обратной стороны ее поверхности, не

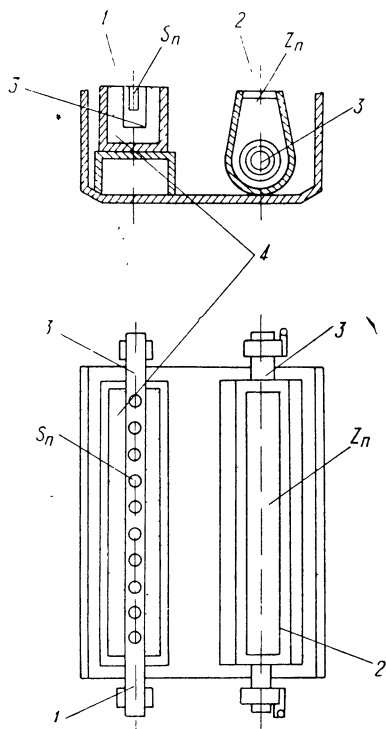


Рис. 47. Печи для испарения олова и цинка

1 — предварительный испаритель (для олова); 2 — главный испаритель (для цинка); 3 — уголь; 4 — теплоизоляция.

экранируемой подушкой. В этом случае на краях получаем круговую металлизацию бумажной ленты, что улучшает условия контактирования обкладки с выводами (см. рис. 26, а).

### Технология металлизации бумаги

При поднятом колоколе устанавливают подготовленные для металлизации рулоны бумаги и бумажные ленты пропускают через ролики, как показано на рис. 44.

В случае металлизации лакированной бумаги рулоны устанавливают так, чтобы металл ложился на лакированную сторону.

Бумага должна выступать с обеих сторон охлаждающей подушки на 0,5—1 мм и плотно прилегать к подушке при движении над испарителями.

Экраны, служащие для получения неметаллизированных полос (закраин), должны быть точно установлены на места, заданные чертежами. При ширине бумажной ленты 38 мм смещение экрана на 1 мм изменяет емкость на 5,5%, а при ширине ленты 24 мм — на 10%. Это показывает, насколько важна точность установки экранов.

После откачки воздуха из-под колокола до остаточного давления 0,05 мм рт. ст. включают подогрев печи для испарения цинка, имеющей увеличенное время разогрева, а после того, как цинк расплавится, включают и печь для испарения олова.

Привод перемотки бумаги сначала включают на медленное вращение, но по мере разогрева печей скорость движения бумаги увеличивают так, чтобы при установлении нормального процесса металлизации достигалось значение скорости порядка 2—4 м/сек. Регулируя скорость движения бумаги и температуру испарителей, обеспечивают получение требуемого значения электропроводности металлического слоя, которая обычно задается в пределах 0,3—1 ом<sup>-1</sup> (см. выше § 5).

Синий оттенок металлического покрытия в отраженном свете говорит о недостаточной толщине подслоя высококипящего металла и, по-видимому, связан с характером структуры слоя цинка (§ 6).

Повышение остаточного давления в процессе металлизации говорит о высокой влажности обрабатываемой бумаги или образовании течи.

## § 22. Особенности металлизации алюминием

Нанесение на бумагу или другие ленточные диэлектрики алюминия по сравнению с цинком представляет значительные трудности, главным образом вследствие малой летучести алюминия. Если для практически необходимой скорости испарения ( $\sim 0,03 \text{ г/сек} \cdot \text{см}^2$ ) цинк достаточно нагреть до температуры  $500\text{—}550^\circ \text{C}$ , то алюминий, для получения той же скорости испарения, необходимо нагреть до температуры  $1300\text{—}1500^\circ \text{C}$ . При таких высоких температурах алюминий весьма агрессивен и быстро разрушает все известные металлы и сплавы. Поэтому конструктивно машины для металлизации алюминием более сложны.

Принципиальная схема установки для нанесения алюминия на ленточный диэлектрик приведена на рис. 48.

Вакуумная камера 1 для снижения газовыделения изготавливается из нержавеющей стали. В верхней части камеры установлена холодильная ловушка, охлаждаемая жидким воздухом, которая после откачки воздуха из-под колокола выдвигается из камеры 3 и в процессе работы установки улавливает водяные пары, выделяемые диэлектриком.

Остаточное давление при испарении алюминия должно быть не более  $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$  Для достижения такого разрежения система для откачки газов в этих машинах комплектуется из трех ступеней откачки — ротационный форвакуумный насос 6, бустерный насос 5 и высоковакуумный насос 8.

На машинах фирмы «Спидвак» для металлизации диэлектриков шириной до 80 см установлены форвакуумный насос типа 13С3000, бустерный насос типа 9В3 и высоковакуумный насос тип 1604.

Механизм перемотки ленты в машинах для металлизации алюминием принципиально не отличается от пермоточных механизмов в машинах для металлизации цинком, поэтому нет необходимости на нем останавливаться.

Печь для испарения алюминия значительно сложнее, чем для испарения цинка. Как уже указывалось, алюминий при температуре, обеспечивающей достаточную интенсивность испарения, очень агрессивен, поэтому испарители конструируются таким образом, чтобы в контакте с испарителем было минимальное количество

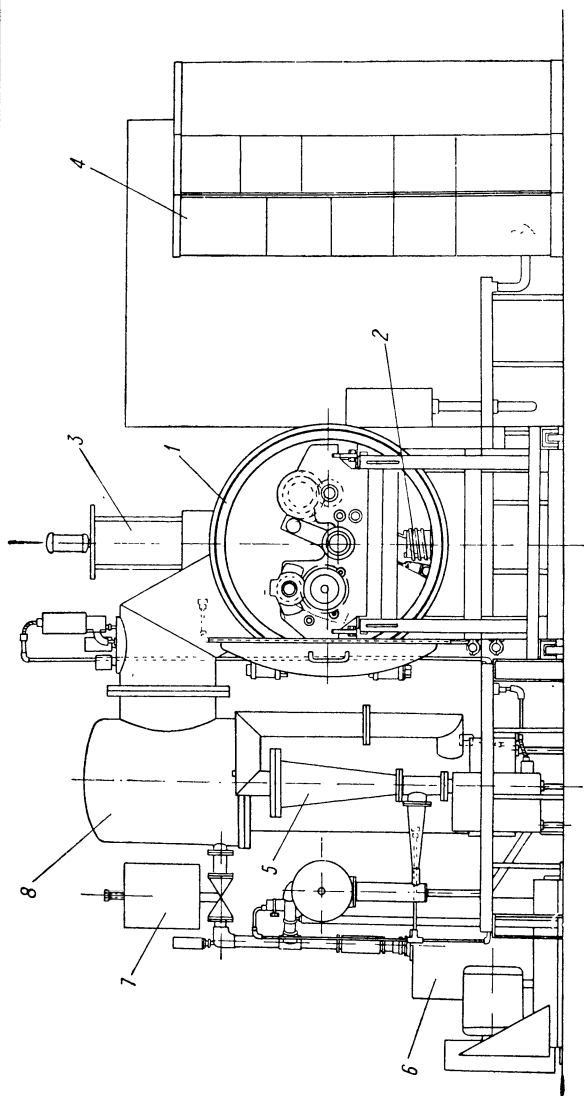


Рис. 48. Схема установки для металлизации бумаги и синтетических пленок алюминием

1 — вакуумная камера; 2 — печь для испарения алюминия; 3 — камера холодильной ловушки; 4 — пульт управления; 5 — бустерный насос; 6 — форвакуумный ротационный насос; 7 — пневматический кран; 8 — вы-соковакуумный насос

металла и по мере испарения он подавался малыми порциями.

На рис. 49 показан испаритель, применяемый фирмой «Спидвак» (Англия). Корпус и крышку изготовляют из стали, нагреватель угольный, а испаритель — из карбида тантала — материала, стойкого к жидкому алюминию.

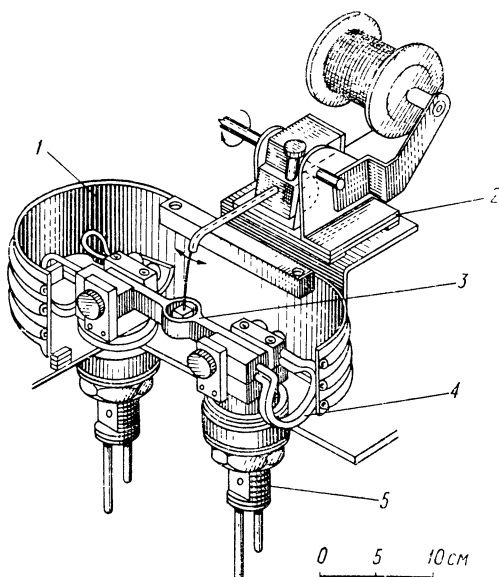


Рис. 49. Печь для испарения алюминия

1 — корпус печи; 2 — изолирующая подставка;  
3 — угольный нагреватель; 4 — гибкие водоохлаждающие трубки; 5 — токопровод.

Испаритель имеет форму кубика, и на него подается порциями алюминиевая проволока, до 0,025 г в каждой порции, обеспечивая скорость испарения до 2 г/мин. По данным фирмы, такой испаритель допускает работу в течение одного часа при подаче алюминия на одну плоскость кубика. После этого кубик поворачивается другой плоскостью и используется для дальнейшего испарения алюминия. Холланд указывает, что нежелательно, чтобы накапливалось большое количество алюминия; в противном случае он стекает на угольный нагреватель и быстро разрушает его.

Для получения высокой температуры ( $\sim 1700^\circ \text{C}$ ) на нагреватель подается большая мощность. Так, по данным фирмы «Спидвак» мощность нагревателя 15 квт. Для покрытия бумажной ленты шириной 80 см устанавливается три таких испарителя. Расстояние от испарителя до бумаги составляет 27,5 см. Хотя расстояние между испарителями относительно велико (порядка 15 см), но при большом удалении бумаги от испарителя обеспечивается достаточная равномерность металлического покрытия.

С целью снижения разогрева близлежащих к испарителю деталей применяется водяное охлаждение корпуса печи и контактов нагревателя.

### **§ 23. Намотка конденсаторных секций**

Намотку секций металлобумажных конденсаторов производят на специальных намоточных станках, которые представляют собой металлическую станину с размещенными на ней шпинделями для установки рулонов бумаги. Число шпинделей должно быть не менее  $2n$ , где  $n$  — число слоев бумаги, принятых в качестве диэлектрика конденсатора.

Для намотки однослойных металлобумажных конденсаторов применяются станки с числом шпинделей не менее трех, так как на один шпиндель устанавливается неметаллизированная бумага для получения начальных и конечных холостых витков. В процессе намотки бумага сматывается с рулонов на оправку станка, образуя конденсаторную секцию. Оправка приводится во вращение с помощью электромотора.

Намоточные станки обычно снабжаются автоматическим устройством для подсчета числа оборотов оправки и остановки после намотки заданного числа витков.

Натяжение бумажных лент регулируют тормозными устройствами, установленными на шпинделях; изменяя степень торможения, добиваются, чтобы при намотке секции бумага не рвалась, а при остановке станка рулоны останавливались без провисания бумажных лент. Сила натяжения бумажной ленты изменяется в широких пределах в зависимости от толщины и ширины бумаги, диаметра оправки и других факторов.

При больших диаметрах рулонов бумаги степень торможения увеличивают, так как рулоны с большим диаметром обладают большой инерцией и при остановках

вращения оправки могут образовать провисание бумажных лент.

При оправках малого диаметра необходимо снижать натяжение бумажных лент, так как при сильном натяжении оправка деформируется, а это вызывает появление складок, направленных вдоль бумажных лент, которые снижают емкость и электрическую прочность изоляции.

Вначале наматывают холостые витки из неметаллизированной бумаги, которые способствуют выравниванию электрического поля в первых рабочих витках секции, а в случае повреждения прилегающего к оправке слоя бумаги при снятии секции, обеспечивают сохранность изоляции между обкладками.

При заправке металлизированной бумаги в начале намотки, а также при обрыве ее в конце, необходимо иметь в виду, что одновременно с обрывом обкладки обрывается и один слой диэлектрика. Поэтому необходимо следить, чтобы при обрыве металлизированной бумаги не была бы снижена общая толщина диэлектрика. Для избежания этого дефекта часто конец металлизированной бумаги загибают металлом во внутрь.

Под 2—3 верхних витка секции закладывается бумажка с индивидуальным номером намотчицы; это позволяет установить виновника брака, при обнаружении какого-либо дефекта намотки на последующих стадиях технологической обработки секций. Расположение бумаги в секции показано в разрезе на рис. 25.

При намотке секции необходимо тщательно следить за тем, чтобы смещение бумажных лент относительно друг друга не выходило за пределы, указанные на этом рисунке.

Увеличение относительного смещения приводит к снижению активной площади обкладок и уменьшению емкости конденсатора. Так, при ширине бумаги 24 мм увеличение смещения на 1 мм дает снижение емкости на 5%.

Недостаточное смещение лент металлизированной бумаги в секции может привести к выходу неметаллизированной бумаги на торец секции, что ухудшает контакт обкладки с полосками, нанесенными напылением.

В процессе намотки нередко образуются складки (рис. 50). В этом случае при опрессовке секций давление распределяется неравномерно по площади секции; в местах расположения складок давление может быть очень

высоким, что вызовет разрушение диэлектрика, в то время как участки, на которых нет складок, оказываются слабо сжатыми. Поэтому секции, имеющие складки, обычно отличаются меньшей емкостью и пониженной электрической прочностью.

Образование складок при намотке секций объясняется неправильным соотношением длин отдельных лент бумаги, которое может быть вызвано следующими основными причинами:

а) различная степень тор-можения рулонов бумаги, установленных на станке;

б) применение одного общего ролика на подходе лент к оправке, что способствует образованию складок на внутренних лентах, прилегающих к ролику;

в) различие во влажности бумаги в разных рулонах; после намотки секции влага перераспределяется между отдельными лентами, причем более сухие ленты, получая влагу, удлиняются, а более влажные сокращаются в длине; это приводит к неправильному соотношению их длин;

г) хранение секций в помещении с высокой относительной влажностью; в этом случае в большей степени увлажняется нелакированная бумага (в многослойных конденсаторах) и дает увеличенный прирост длины в сравнении с лакированной бумагой, несущей металлический слой.

Для того чтобы избежать образования складок при намотке и хранении секций, принимают следующие меры:

а) добиваются равномерного натяжения бумажных лент при намотке секции и не пропускают несколько лент через один ролик;

б) для намотки секций применяют только хорошо высушенную бумагу;

в) намотанные секции хранят в шкафах с сухим воздухом или под вакуумом;

г) в начальные холостые витки закладывают вкладыш из электрокартона длиной, равной ширине наматываемой

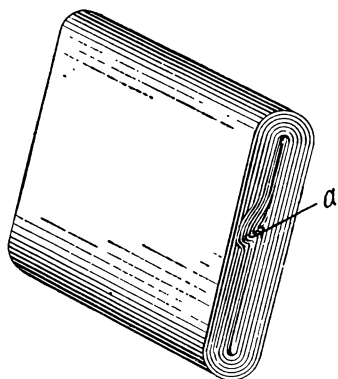


Рис. 50. Секция металлобумажного конденсатора со складками (а), видными на торце.

бумаги, а шириной, равной половине периметра оправки, или же ведут намотку на электроизоляционную втулку; после снятия секции с оправки такой вкладыш (или втулка) растягивает внутренние витки секции и снижает количество складок.

При изготовлении конденсаторных секций нередко требуется ориентировочно определить исходные данные для намотки.

Расчет может быть произведен по известной формуле для намотанного конденсатора:

$$C = 0,1768 \frac{\epsilon b L}{d}, \quad (28)$$

где  $L$  — длина ленты, см;

$b$  — ширина активной части металлизированной бумаги, см.;

$d$  — толщина диэлектрика, см;

$C$  — емкость, пф.

Толщина диэлектрика выбирается по заданному напряжению и условиям работы конденсатора.

Обычно задается емкость и ширина металлизированной бумаги и требуется найти длину лент:

$$L = \frac{Cd}{0,1768 \epsilon b}. \quad (29)$$

Если подставить емкость в мкф, толщину диэлектрика в мм и ширину  $b$  в см, то длина ленты будет равна:

$$L = 6,98 \frac{Cd}{\epsilon b}; \quad (30)$$

здесь длина ленты выражена в метрах.

Практически в металlobумажных плоских секциях, которые спрессованы при определенном давлении, величина  $\epsilon$  равна 4,5 и мало изменяется для различных партий бумаги. Поэтому, пользуясь данной формулой, удастся подсчитать длину ленты с ошибкой, не превышающей 10—15%.

Для цилиндрических секций расчеты по данной формуле дают большую погрешность, так как емкость значительно изменяется в зависимости от натяжения лент при намотке секции. Для более точного определения длины ленты при заданной емкости прибегают к изготовлению опытных партий.

Непрерывное расширение выпуска металлобумажных конденсаторов делает особенно актуальным вопрос о полной автоматизации процесса намотки для повышения его производительности. Этот вопрос, в частности, рассматривается в работе Арндта (ГДР), который отмечает, что при переходе на намоточные автоматы можно повысить выпуск на 300%.

Процесс намотки можно разбить на три этапа: начало, собственно намотка и окончание. Каждый из этих этапов ставит свои задачи перед конструктором намоточного автомата. Основные проблемы начального этапа намотки: установка намоточной оправки, закрепление в ней первой ленты, которая будет тянуть остальные ленты секции конденсатора, автоматическая подача в оправку этих остальных лент. Основная проблема среднего этапа, т. е. собственно намотки, создающей активную часть обкладок, образующую емкость конденсатора: обеспечение требуемой точности емкости. Часто это достигается регулированием требуемой активной длины обкладок, которую можно выдержать с точностью до  $\pm 2,5\%$ .

Основные проблемы последнего, заключительного этапа намотки: обрезка лент, заклейка секции, снятие секции с оправки. Контрольное устройство намоточного автомата, подсчитывающее его производительность, должно быть связано со сбрасывающим устройством, выдающим готовые намотанные секции. Специальное устройство должно останавливать автомат при обрыве одной из наматываемых лент.

Такие автоматы для намотки секций металлобумажных конденсаторов сдвоенного типа созданы в ГДР. Они наматывают сразу две секции; автомат останавливается при обрыве любой из лент на любой его половине; световой сигнал показывает, на какой половине произошел обрыв. О том, что на одном из поставленных на станок рулонов скоро смотается вся лента и его пора сменить, также дается специальный световой сигнал.

В капиталистических странах так же уделяется внимание вопросу автоматизации намотки секций металлобумажных конденсаторов, о чем можно судить по ряду выданных патентов.\* Успешная разработка намоточных автоматов ведется и в Советском Союзе.

---

\* Патент ФРГ, № 1104067, кл. 21g, 10/02, 20. 09. 1962; Патент Франции, № 1311298, кл. H01g, 29. 10. 1962 г. и др.

## § 24. Прессовка и контактирование секций

Секции металлобумажных конденсаторов, намотанные на больших оправках (диаметром  $\sim 5$  мм и более), подвергаются сжатию на прессе. Сжатие секции устраняет воздушные прослойки между бумагами, что позволяет при той же толщине диэлектрика и той же площади обкладок получить большую емкость.

С другой стороны, сильное сжатие может вызвать и повреждение диэлектрика, особенно по местам складок, что приводит к снижению электрической прочности и сопротивления изоляции конденсаторов.

Наиболее вероятны механические повреждения в секциях с тонким диэлектриком; поэтому давление при опрессовке таких секций должно быть строго дозированным. Для однослойных секций опрессовка производится при давлении  $2 \text{ кг/см}^2$ , а для многослойных секций — при давлении  $8 \text{ кг/см}^2$ .

Иногда производят опрессовку секций до получения расчетного значения толщины секции (без контроля давления), однако такой способ следует признать неудовлетворительным, так как возможные колебания толщины бумаги доходят до  $\pm 8\%$ , что вызывает соответствующие изменения степени сжатия секций. Практически при таком методе опрессовки давление на секции может колебаться в пределах от 2 до  $15 \text{ кг/см}^2$ . Это обстоятельство может сильно повлиять на величину сопротивления изоляции и электрическую прочность конденсатора.

Для опрессовки, а также для последующего контактирования и пропитки, секции собирают в специальные струбины (рис. 51) и производят их сжатие на гидравлических или пневматических прессах, позволяющих производить точный отсчет установленного давления.

Необходимое усилие сжатия при опрессовке находят по величине площади, образуемой при сплющивании первого витка секции, и по заданному значению удельного давления:

$$P = \frac{\pi D_0}{2} b p, \quad (31)$$

где  $D_0$  — диаметр оправки, см;

$b$  — ширина бумаги, см;

$p$  — удельное давление, которым должны быть сжаты данные секции,  $\text{кг/см}^2$ .

Давление, которое должен показать манометр пресса, может быть найдено по формуле:

$$p' = \frac{Pn}{S}, \quad (32)$$

где  $P$  — сила сжатия, подсчитанная на одну секцию по формуле (31);

$n$  — количество секции в ряду струбины;

$S$  — площадь поршня пресса.

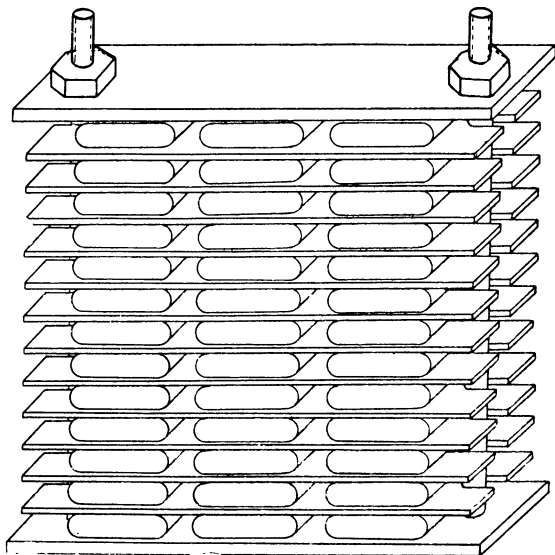


Рис. 51. Струбина для сжатия плоских секций перед их контактированием.

Цилиндрические секции сжатию не подвергают, а контактирование их производят в специальных сборках (рис. 52).

Контактирование заключается в нанесении на торцы секции переходного слоя металла, обеспечивающего надежный контакт с тонкими обкладками металлобумажных конденсаторов и позволяющего произвести припайку проволочного вывода.

Контактирование производится путем напыления расплавленного металла на торцы секции. Мелкие частицы

металла, попадая на обкладки, нанесенные на диэлектрик и выходящие на торец секции, не разрушают обкладок, а, частично сплавляясь с последними, образуют надежный электрический контакт. В то же время мелкие частицы металла проникают в неровности торца секции, в результате чего напыленный слой прочно удерживается на торцах секции.

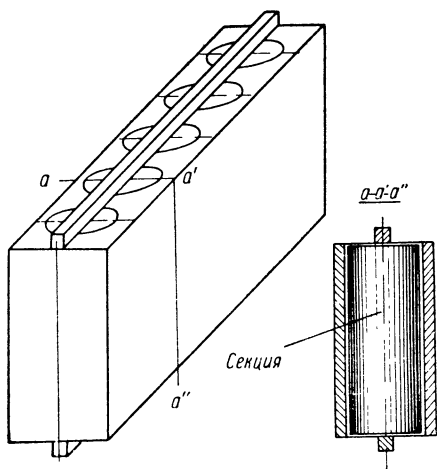


Рис. 52. Приспособление для контактирования цилиндрических секций.

Для напыления выбирается металл, дающий хороший электрический контакт с обкладками и позволяющий производить припайку к нему проволочного вывода.

Аппарат для контактирования (рис. 53) позволяет производить расплавление металла в тигле 1 и распыление с помощью сжатого воздуха тонкой струйки жидкого металла, вытекающего из сопла аппарата 2. Электромагнит 3 служит для открывания клапана, выпускающего струю металла из аппарата. С помощью такого аппарата удастся хорошо распылять легкоплавкие металлы с температурой плавления не выше  $400^{\circ}\text{C}$ .

Для нанесения металлов с более высокой температурой плавления применяются специальные металлизаторы — «пистолеты». Основное их назначение — нанесение тонкого металлического слоя на металлические по-

верхности. Такие покрытия делают обычно с целью восстановления изношенных деталей, но эти же пистолеты могут быть использованы и для нанесения тугоплавких металлов на торцы секций металlobумажных конденсаторов.

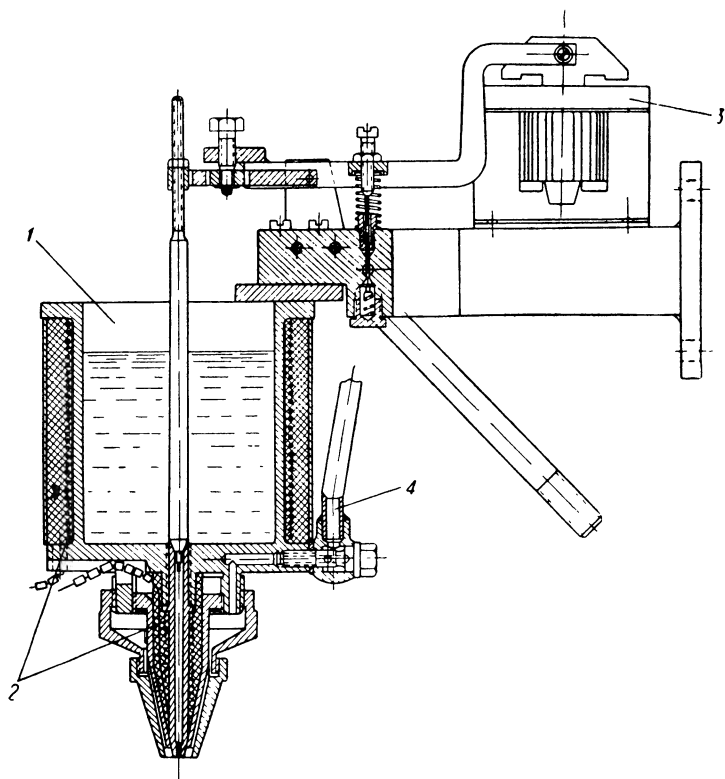


Рис. 53. Аппарат для контактирования секций металlobумажных конденсаторов металлами и сплавами с низкой температурой плавления  
1 — ванна для плавления металла; 2 — электронагреватель и сопло; 3 — электромагнит; 4 — воздухопровод.

Применяемые для металлизации пистолеты по способу разогрева распыляемого металла разделяются на газовые и электродуговые (рис. 54). В Советском Союзе более широкое распространение получила электродуговая металлизация.

Принцип работы электродугового металлизатора заключается в следующем: через аппарат проходят одновременно две проволоки из металла, предназначенного для получения покрытия. Эти же проволоки служат электродами для создания электрической дуги. Подача проволоки осуществляется специальным механизмом, приводимым в движение маленькой быстроходной воздушной турбиной. При выходе из аппарата возле воздушного сопла концы обеих проволок сходятся и образуется электрическая дуга, оплавляющая проволоку. Расплавленный металл увлекается воздухом, распыляется на мелкие частицы и осаждается на металлизируемой поверхности.

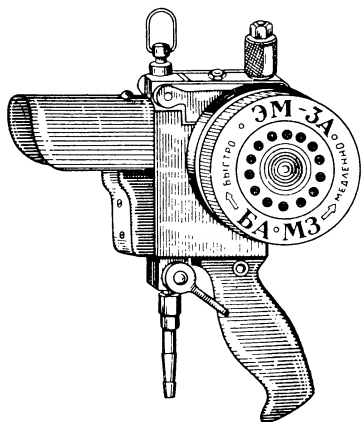


Рис. 54. Пистолет для контактирования секций металлами с высокой температурой плавления.

Работу аппарата регулируют, добиваясь получения хорошего контакта напыляемого металла с обкладками без разрушения диэлектрика на торцах секций.

При большом расстоянии между аппаратом и контактируемыми секциями и мелком распылении, частицы металла будут полностью затвердевать на пути их движения к торцам секций. В результате такого напыления полученный слой механически не прочен и не имеет хорошего электрического контакта с обкладками. Наоборот, при очень близком расположении секции от аппарата и при плохом распылении крупные частицы разрушают выходящие на торец секции обкладки, а также и диэлектрик.

Практически, при настройке аппаратов сначала добиваются мелкого распыления металла, а потом находят оптимальное расстояние между аппаратом и секциями. Кроме того, воздух, используемый в аппаратах для распыления, предварительно может подогреваться, что позволяет увеличить расстояние между аппаратом и секциями.

Практически, при настройке аппаратов сначала добиваются мелкого распыления металла, а потом находят оптимальное расстояние между аппаратом и секциями. Кроме того, воздух, используемый в аппаратах для распыления, предварительно может подогреваться, что позволяет увеличить расстояние между аппаратом и секциями.

Для контактирования секций металлобумажных конденсаторов, изготовленных с цинковым покрытием бумаги, обычно применяют сплав олова (40%) и свинца (60%). Для контактирования секций, изготовленных из бумаги с алюминиевым покрытием, применяют более высокоплавкие материалы, дающие хороший контакт с алюминиевыми обкладками, обычно цинк или медь.

Толщина контактного слоя выбирается из условия получения минимально необходимой толщины для припайки проволочного вывода. Когда толщина металла недостаточна, при попытке припаять вывод, контактный слой полностью оплавляється и собирается на паяльник. Восстановить контактный слой в этих случаях не удастся.

Нанесение слишком толстого контактного слоя приводит к увеличению размеров секции и непроизводительному расходу металла.

Для секций из бумаги с цинковым покрытием толщина контактного слоя из свинцово-оловянного сплава колеблется от 0,4 до 0,7 мм. Для секции из бумаги с алюминиевым покрытием и при применении более тугоплавких материалов для контактирования, толщина слоя снижается до 0,2 — 0,3 мм.

Для облегчения сушки и пропитки секций контактный слой наносится не на всю поверхность торцов секции, а с оставлением свободных участков (см. рис. 25, в). Получение такого характера покрытия обеспечивается контактированием через трафарет.

При нанесении свинцово-оловянного или другого сплава с предварительным плавлением, металл, попадающий на трафарет, снимают и вновь загружают в тигель для вторичного использования.

## § 25. Сушка и пропитка секций

Сушка и пропитка конденсаторных секций являются весьма ответственными операциями в технологии производства металлобумажных конденсаторов и в значительной степени определяют качество последних.

Процесс сушки секций имеет целью возможно более полное удаление влаги, содержащейся в конденсаторных секциях, т. е. здесь ставится та же задача, что и при сушке бумаги перед металлизацией. Однако, если в процессе подготовки бумаги к металлизации критерием качества сушки может служить последующее удовлетворительное

проведение процесса металлизации, то в данном случае критерием качества сушки секций, при прочих равных условиях, являются высокие электрические характеристики готовых конденсаторов.

Количество воды, остающейся в бумаге после сушки до установившегося состояния, как указано в § 20, является функцией двух основных факторов: температуры и давления газов в сушильном баке.

В производстве бумажных конденсаторов с фольговыми обкладками секции предварительно подвергают воздушной сушке, а затем вакуумной. Такой прием позволяет ускорить время прогрева секции и уменьшить загрузку вакуумного оборудования.

Малая стойкость к окислению тонких обкладок в металlobумажных конденсаторах не позволяет использовать такой же прием, и приходится весь процесс сушки секций этих конденсаторов проводить под вакуумом.

Для вакуумной сушки и пропитки секций применяется относительно сложное оборудование (см. рис. 40). Существует большое число различных типов сушильно-пропиточных установок с различным конструктивным оформлением, но наибольшее распространение получили агрегаты с тремя баками. Два бака 1 служат для сушки и пропитки секций, а один бак 2, обычно расположенный выше, для подготовки и хранения пропитывающего состава.

Поскольку прогрев секций, в целях сохранения обкладок, производится под вакуумом, то и время прогрева оказывается значительным. В производстве не удается разделять время прогрева и время сушки, а задается общее время, необходимое для достаточно полного удаления влаги.

Полное время, необходимое для сушки секций, колеблется в зависимости от размеров секций и степени загрузки баков в широких пределах от 6 до 30 ч.

Остаточное давление при сушке секций должно быть минимально возможным. Современное пропиточное оборудование обеспечивает получение остаточного давления при сушке секций металlobумажных конденсаторов] до 0,05—0,2 мм рт. ст.

В настоящее время имеется тенденция повышать требования к разрежению при сушке секций и уже разработаны агрегаты для работы при остаточном давлении 0,001 мм рт. ст.

Температура в процессе сушки секций поддерживается в пределах от 100 до 130° С.

Одновременно с сушкой секций ведется подготовка пропитывающего состава. Для пропитки секций металлобумажных конденсаторов постоянного тока, как правило, применяются твердые воскообразные пропиточные составы (синтетический или натуральный церезин). Зарубежные фирмы применяют также пропитку полимеризующимися синтетическими смолами, а иногда полиизобутиленом.

Для пропитки металлобумажных конденсаторов переменного тока применяют обычно вязкие пропиточные массы, например вазелин. Более жидкие массы для плоских секций металлобумажных конденсаторов применять нецелесообразно, так как в этом случае секции будут деформироваться при сборке, что может вызвать нарушение контакта между обкладками и накладками, нанесенными при контактировании.

Пропитывающий состав перед использованием его для пропитки секций подвергают вакуумной сушке. Сушку производят при температуре 110—120° С и остаточном давлении не выше 0,2 мм рт. ст. в конце цикла. Время сушки пропитывающего состава колеблется от 2 до 6 часов. После окончания сушки секций и пропитывающего состава производят пропитку секций.

Впуск пропитывающего состава в пропиточный бак с секциями производят под вакуумом и постепенно. Остаточное давление в процесс заливки пропитывающего состава в котле с секциями должно быть возможно малым, не выше 0,5 мм рт. ст.

Высокое разрежение в процессе заливки пропитывающего состава значительно повышает электрическую прочность бумаги и позволяет получить увеличенную емкость (рис. 55).

За ходом пропитки можно следить, наблюдая изменение емкости в процессе пропитки. Прекращение роста

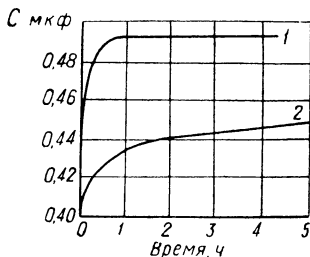


Рис. 55. Зависимость емкости бумажных конденсаторов от времени пропитки парафином

1 — впуск парафина в пропиточный бак без вакуума; 2 — впуск под вакуумом (Ренне).

емкости указывает, что при заданных условиях пропитка завершена. Дальнейшее увеличение времени пропитки уже не дает эффективных результатов. В производстве металлобумажных конденсаторов применяют время пропитки от 1 до 3 часов в зависимости от размеров секций.

Во время пропитки в котле постоянно поддерживают высокое разрежение, что обеспечивает хорошую пропитку секций и позволяет сохранить пропитывающий состав от окисления.

Температуру в процессе пропитки поддерживают в пределах от 110 до 120° С для пропитывающих составов с температурой каплепадения ниже 90° С и 115—125° для пропитывающих составов с более высокой температурой каплепадения.

После окончания пропитки пропитывающий состав перегоняют давлением воздуха в бак для пропитывающего состава, а пропитанные секции переносят для охлаждения в вакуумные шкафы или шкафы с сухим воздухом.

Наблюдения за процессом пропитки путем измерения емкости, проведенные И. В. Новопащенко, показали, что время пропитки может быть несколько сокращено в сравнении с обычной практикой.

Время сушки секции, по-видимому, также может быть сокращено, если в начале процесса вести сушку не в условиях вакуума, а в атмосфере сухого воздуха, что обеспечит быстрый прогрев и не будет приводить к разрушению обкладок. Такие условия обеспечиваются при описанном выше комбинированном методе сушки бумаги перед металлизацией, который, следовательно, с успехом может быть использован и для сушки секций металлобумажных конденсаторов с цинковыми обкладками. Тонкие цинковые обкладки интенсивно разрушаются при высокой относительной влажности, но достаточно устойчивы при низкой влажности даже при повышенных температурах.

## **§ 26. Тренировка секций металлобумажных конденсаторов и контроль их электрических характеристик**

После охлаждения секций в вакуумных баках или шкафах с сухим воздухом струбины разбираются и секции поступают на тренировку или проверку электрической прочности.

Охлаждение струбцин с секциями необходимо вести в условиях минимальной относительной влажности, так как при повышенной температуре пропитывающий состав интенсивно адсорбирует газы и водяные пары. С понижением температуры снижается адсорбирующая способность пропитывающего состава к парам и газам, а при

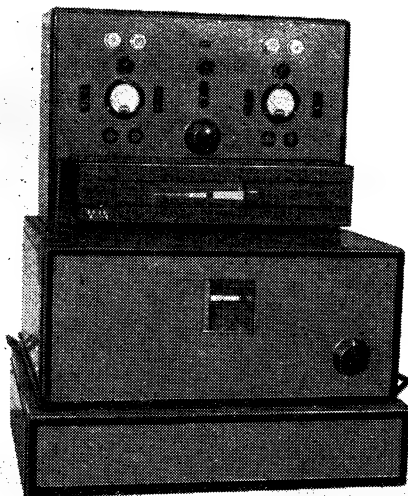


Рис. 56. Полуавтомат для тренировки секций металлобумажных конденсаторов.

затвердении его значительно затрудняется проникновение растворенных газов в глубину секции.

Однослойные секции металлобумажных конденсаторов после пропитки обычно бывают закороченными или же имеют весьма низкое значение сопротивления изоляции. Поэтому все однослойные секции после охлаждения и разборки струбцин подвергаются тренировке.

Тренировка, как указывалось в первой главе, заключается в изолировании проводящих или слабых мест диэлектрика путем разрушения обкладки вокруг дефектного участка. Тренировку обычно осуществляют на полуавтоматах (рис. 56), в которых на секцию подается ряд импульсов напряжения с переменной полярности.

Процесс тренировки можно разделить на два этапа:  
1) отключение участков диэлектрика, закорачивающих обкладки секции;

2) отключение участков диэлектрика, имеющих низкую электрическую прочность.

Для осуществления первого этапа необходимо через проводящее включение пропустить большой ток, который разрушил бы обкладку вблизи места короткого замыкания.

Для пропускания большого тока необходим источник, обеспечивающий подвод значительной энергии. Поэтому первичную тренировку проводят путем разряда на тренируемую секцию конденсатора большой емкости. Принципиальная схема первичной тренировки приведена на рис. 57, а.

После того, как устранено короткое замыкание обкладок, секция может быть заряжена. Второй этап тренировки заключается в зарядке секции металлобумажных конденсаторов до напряжения, несколько выше испытательного.

В процессе зарядки секций участки диэлектрика, имеющие низкую электрическую прочность, будут пробиваться, а ток, притекающий к каналу пробоя, разрушит часть обкладки, расположенную в непосредственной близости к месту пробоя; этим достигается отключение участков диэлектрика, имеющих низкую электрическую прочность.

Принципиальная схема вторичной тренировки приведена на рис. 57, б. Существующее оборудование для тренировки секций металлобумажных конденсаторов воспроизводит оба эти этапа.

По технологии, принятой в Советском Союзе, первый этап тренировки проводится путем подачи на тренируемую секцию напряжения от конденсатора  $C$  емкостью 300—500 мкф, заряженного до 100—200 в.

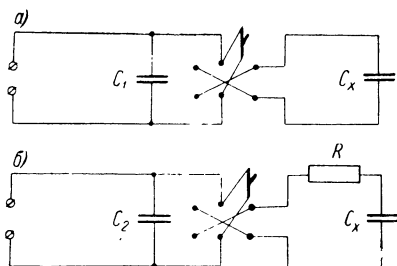


Рис. 57. Принципиальные схемы тренировки металлобумажных конденсаторов: а — первичная тренировка; б — вторичная тренировка

$C_x$  — тренируемый конденсатор (или секция);  $C_1$  — конденсатор большой емкости;  $C_2$  — конденсатор небольшой емкости (0,5—1 мкф);  $R$  — ограничивающее сопротивление, 300—400 ком.

Вторичная тренировка проводится путем постепенного повышения напряжения, поданного от выпрямителя через сопротивление, равное 300—400 *ком*, до такого значения, которое превышает испытательное напряжение конденсатора на 10—20 %.

Многослойные пропитанные секции металлобумажных конденсаторов в большинстве случаев не закорочены и имеют высокое сопротивление изоляции, но небольшая часть из них порядка 2—5 % все же имеет короткое замыкание обкладок, по-видимому, за счет проникновения металла в складки бумаги при контактировании. Такие секции не удастся оттренировать путем медленного повышения напряжения, поданного от выпрямителя; на них необходимо подавать импульс напряжения от заряженного конденсатора, так же как при первичной тренировке однослойных секций.

У секций металлобумажных конденсаторов после тренировки проверяют их электрическую прочность, сопротивление изоляции, емкость и тангенс угла потерь.

Проверке по электрической прочности, сопротивлению изоляции и емкости подвергаются все секции; для контроля этих параметров разработаны полуавтоматы, обеспечивающие высокую производительность. Так, полуавтомат ПТРС-ШМ производит тренировку секций и выбраковку их по сопротивлению изоляции с производительностью до 2000 штук в час.

Контроль тангенса угла потерь производится выборочно на отдельных образцах; обычно проверяется не более 10 % от каждой партии конденсаторов. Эта операция проводится на мостах промышленной или звуковой частоты.

Проверка основных параметров секций металлобумажных конденсаторов до закладки их в корпуса позволяет значительно снизить или полностью избежать брака в готовых конденсаторах по электрическим характеристикам. С другой стороны, тренировка и контроль секций требует значительного времени, а длительное пребывание пропитанных секций на открытом воздухе может значительно снизить их электрические характеристики. Поэтому при изготовлении металлобумажных конденсаторов пропитанные секции не должны находиться на воздухе более того времени, которое необходимо для их технологической обработки. Все остальное время секции должны находиться в шкафах с сухим воздухом или в вакуумных бачках.

Технологические инструкции обычно оговаривают максимально допустимое время пребывания пропитанных секций на открытом воздухе и в шкафах с сухим воздухом. В Советском Союзе время хранения на открытом воздухе принято не более 48 часов, а в шкафах сухого воздуха ограничено 5 сутками.

## **§ 27. Сборка конденсаторов**

Металлобумажные конденсаторы, как указывалось в третьей главе, выпускают, главным образом, в металлических корпусах, вследствие чего секции должны быть изолированы от корпуса. Для этой цели применяют электротехнический картон, а также кабельную и конденсаторную бумагу.

Для сборки металлобумажных конденсаторов применяют пропитанные и проверенные секции. Все материалы, используемые при монтаже, также должны быть тщательно высушены и пропитаны, для того чтобы вместе с монтажным материалом не вводить в корпус влагу.

Сушку и пропитку монтажного материала обычно проводят по тому же режиму, который принят для обработки конденсаторных секций; иногда применяют предварительную сушку без вакуума. С целью предохранения монтажного материала от адсорбции влаги из воздуха его хранят после пропитки так же, как и секции в шкафах с силикагелем, или в вакуумных бачках.

Секции, спаянные в блок нужной емкости, оборачивают кабельной или конденсаторной бумагой, помещают в изоляционную коробку из электрокартона и вместе с коробкой ставят в корпус. В корпусе пакет с секциями закрепляют уплотняющими прокладками из пропитанного электрокартона, так чтобы препятствовать перемещению пакета и отдельных секций. Прокладки закладываются как с боковой стороны секций, так и с верхней стороны пакета, под крышку корпуса.

При сборке некоторых типов металлобумажных конденсаторов, работающих при температуре не выше  $60^{\circ}\text{C}$  в условиях сильных механических воздействий в виде вибраций или тряски, производят заливку пакета секций в корпус церезином.

Обычно церезин заливают через специальные отверстия в крышке корпуса; для этого конденсаторы опускают в бак с расплавленным церезином и ведут откачку в те-

чение 3—4 мин до остаточного давления 1—5 мм рт. ст. Далее в бак дается атмосферное давление на 3—4 мин, после чего конденсаторы вынимают и заливочные отверстия запаивают. Более длительная выдержка конденсаторов в расплавленном церезине может привести к размягчению пропиточного состава в конденсаторных секциях, что вызвало бы усадку пакета при последующем охлаждении. При этом не получилось бы желаемого уплотнения пакета в корпусе.

Поскольку пакеты в корпусах предварительно уплотнены, заливочный состав располагается в виде тонких слоев и при затвердевании не образует пустот, позволяющих пакету перемещаться в корпусе. Залитые церезином конденсаторы надежно работают при воздействии вибрации и тряски.

Конденсаторы для цепей переменного тока, а также и других типов, для которых необходимо улучшение теплопередачи внутри корпуса, после монтажа пакета в корпусе заливают жидким или вязким заливочным составом.

Заливку конденсаторов жидкими составами, не преследующую цели дополнительного уплотнения, обычно совмещают с подсушкой смонтированных конденсаторов. Такие конденсаторы в течение 4—6 часов сушат под вакуумом, и после этого в котел с конденсаторами впускают заливочную массу. Затем котел соединяют с атмосферой и после выдержки в течение 15 мин при атмосферном давлении конденсаторы вынимают и заливочные отверстия запаивают.

## **§ 28. Припайка или приварка крышек к корпусам**

На корпуса с заложенными в них и уплотненными пакетами надевают подготовленные крышки с заранее впаянными или вваренными изоляторами, после чего производят проверку на отсутствие короткого замыкания между выводами и корпусом. Соединение крышек с корпусом, в зависимости от типа конденсатора, производят пайкой или сваркой.

Конденсаторы, предназначенные для работы при температуре до  $+85^{\circ}\text{C}$ , обычно запаивают припоем ПОС-40 или ПОС-60. В качестве флюса применяют раствор канифоли в этиловом спирте или в конденсаторном масле. Также применяют сплав церезина, канифоли с добавкой моющего средства ОП-4 в соотношении: канифоль 50 %,

церезин или стеарин 47% и ОП-4—3%, который удобен тем, что хорошо флюсует и быстро застывает, не загрязняя рабочего места.

Пайка производится электропаяльником или на конвейерных установках с высокочастотным нагревом деталей. При пайке высокой частотой пользуются проводочным припоем, который в виде кольца или прямоугольника, соответствующего периметру корпуса, закладывается под крышку. При нагревании стенок корпуса и крышки припой расплавляется, и крышка пружинами, установленными в приспособлении для пайки, осаживается до упора на стенки корпуса.

Крышки металлобумажных конденсаторов, предназначенных для работы при температуре выше 85° С, обычно привариваются. Приварка осуществляется на специальных полуавтоматах или вручную, методом дуговой сварки с угольным электродом. Электрод проходит по периметру корпуса, осуществляя его сварку с крышкой. Сварка проводится в нейтральной среде.

Приварка крышек цилиндрических конденсаторов иногда производится на машинах шовной сварки, которые легко могут быть приспособлены для этой цели. Игнитронные прерыватели этих машин позволяют хорошо регулировать режим сварки и получать надежные герметичные швы.

## **§ 29. Проверка на герметичность заделки корпусов и качества уплотнения**

Характеристики всех конденсаторов ухудшаются при увлажнении диэлектрика. Конденсаторы с бумажным диэлектриком при проникновении влаги значительно снижают сопротивление изоляции, увеличивают тангенс угла потерь и емкость. В металлобумажных конденсаторах попадание влаги, кроме того, может привести к ускоренному разрушению обкладок. Поэтому все металлобумажные конденсаторы имеют защиту от влаги.

В настоящее время, как указывалось в третьей главе, применяют различные способы влагозащиты. Для уверенности в том, что выпускаемый конденсатор надежно защищен от проникновения влаги, у всех конденсаторов проверяют качество герметизации или уплотнения.

Применяют различные методы проверки; их можно разделить на две основные группы:

1) наличие неплотностей (течи) обнаруживается по выделяющимся пузырькам воздуха;

2) наличие неплотностей (течи) обнаруживается по вытекании пропитывающего или заливочного состава.

По выделению пузырьков воздуха проверяют конденсаторы, не подвергавшиеся после закладки секций дополнительной заливке. В этом случае в корпусе конденсатора всегда имеется некоторое количество воздуха, и при нагревании внутри корпуса создается избыточное давление, что обуславливает вытекание воздуха в местах неплотной заделки корпуса.

Такую проверку производят обычно опусканием конденсаторов в прозрачное минеральное масло, нагретое до температуры  $90-110^{\circ}\text{C}$ . Через некоторое время воздух в конденсаторе нагреется и при наличии неплотностей в заделке корпуса начинает выходить в виде мелких пузырьков. При внимательном наблюдении легко обнаруживается место течи, а поэтому не встречается принципиальных трудностей в исправлении таких конденсаторов.

Иногда такую проверку ведут при комнатной температуре, а для получения избыточного давления в корпусе ванну с проверяемыми конденсаторами помещают под стеклянный колпак (колокол) и откачивают из-под него воздух. Этот метод оказался менее удобным, так как при откачке воздуха масло начинает «кипеть», выделяя адсорбированные и растворенные газы. В этот момент наблюдать выделение воздуха из конденсаторов довольно трудно. По мере обезгаживания масло «кипит» меньше и удается заметить дефектные конденсаторы, но точно зафиксировать место течи при таком способе проверки довольно трудно.

Испытание конденсаторов на герметичность по вытеканию пропитывающего состава проводят путем помещения их в термостат, температура в котором установлена выше температуры плавления пропиточной массы. При нагревании пропитывающий состав плавится, а образовавшееся избыточное давление вытесняет его в местах неплотной заделки корпуса наружу.

Вытекающий пропиточный состав может быть обнаружен по пятнам на бумаге, для чего конденсаторы раскладываются на чистой бумаге или каждый конденсатор заворачивается в отдельную бумажку. Для обнаружения вытекающего пропиточного состава часто также пользуются

ртутно-кварцевой лампой, в лучах которой большинство материалов, применяемых для пропитки, флюоресцирует.

Время прогрева обычно принимают около одного часа, а температуру порядка  $100^{\circ}\text{C}$ .

Для конденсаторов, которые не желательно длительно прогревать, например, для уплотненных заливкой церезином, применяют кратковременный нагрев, когда успевают прогреться только стенки корпуса и верхние слои пакета. Для этого конденсаторы помещают в термостат с заранее установленной температурой  $160\text{--}200^{\circ}\text{C}$  на время 8—12 мин и наблюдают за вытеканием пропитывающего состава.

Указанные выше методы проверки качества герметизации или уплотнения секций в корпусе, при тщательном их выполнении, позволяют достаточно надежно отбраковывать дефектные конденсаторы.

### § 30. Противокоррозийные покрытия

С целью защиты от коррозии металлические корпуса и выводы конденсаторов покрывают противокоррозийными покрытиями. Исключение составляют алюминиевые корпуса, в которых конденсаторы выпускаются обычно без покрытий.

Существует много различных противокоррозийных покрытий; из них в конденсаторостроении применяют, в основном, два типа: металлические и лакокрасочные. Для более надежной защиты иногда применяют комбинированные покрытия: на металлическое наносят лакокрасочное.

Наиболее распространенными из металлических покрытий являются: 1) цинковые; 2) кадмиевые; 3) никелевые; 4) хромовые; 5) оловянные; 6) свинцовые.

Особенность цинковых и кадмиевых покрытий заключается в том, что они защищают сталь электрохимически. Цинк и кадмий, используемые как покрытия, действуют в качестве анодов, предохраняя от коррозии железо, являющееся по отношению к ним катодом. Цинк хорошо защищает сталь от коррозии и поэтому находит широкое применение. Недостатком цинковых покрытий является то, что цинк быстро корродирует на воздухе при повышенной температуре и влажности, например, в тропиках.

Кадмиевые покрытия более устойчивы, чем цинковые и хорошо паяются при использовании флюсов, не активных в коррозионном отношении. Наиболее распространенным

способом кадмирования является электролитическое осаждение кадмия из цианистых ванн. Кадмиевые покрытия пока не получили широкого распространения, по-видимому, ввиду высокой стоимости.

Никелевые и хромовые покрытия по отношению к стали являются катодами, а поэтому обеспечивают защиту только при сплошном покрытии, которое получается при толщинах не менее 25 мк. Никелевые и хромовые покрытия плохо паяются, и их применяют только для изделий, работающих в сухих помещениях, когда необходимо придать изделиям хороший внешний вид.

Оловянные покрытия также являются катодами по отношению к стали, поэтому коррозия, начинающаяся в порах, может привести к отставанию всего покрытия. Для получения стойкого покрытия необходимо, следовательно, создание сплошного слоя олова.

Гальванические покрытия оловом образуют сплошной слой при толщинах порядка 20 мк. При горячем лужении получается переходный слой на границе олова с железом, состоящий из химического соединения  $\text{Fe Sn}_2$ , по которому располагается слой олова. Оловянные покрытия этого типа получаются сплошными и лучше защищают стальные изделия. Толщина покрытия при горячем лужении может быть от 2 до 30 мк, в зависимости от принятой технологии.

Свинцовые покрытия, полученные методом погружения, а также гальваническим методом не дают сплошных покрытий. Сплошное и прочно связанное с основным металлом покрытие получается методом окунания при добавлении к свинцу 2—25 % олова.

Для получения хорошей противокоррозионной защиты с помощью лакокрасочного покрытия необходимо соблюдать следующие условия:

- 1) тщательная подготовка поверхности;
- 2) составление правильного технологического процесса окраски и точного его выполнения.

Срок службы лакокрасочных покрытий зависит, в первую очередь, от качества подготовки поверхности перед окраской. Изделие перед окраской должно быть тщательно обезжирено и очищено от ржавчины и окалины.

Для повышения сроков службы лакокрасочного покрытия рекомендуется производить предварительное фосфатирование поверхности изделия. При этом на поверхности образуется пленка нерастворимых фосфорнокислых солей,

обладающих защитными свойствами против коррозии. Эта пленка имеет мелкокристаллическую структуру, обеспечивающую хорошую впитываемость лакокрасочных материалов при окраске, и тем самым улучшающих адгезию последних.

При местном повреждении лакокрасочной пленки и фосфатного слоя распространение ржавчины локализуется, в то время, как на нефосфатированном металле ржавчина быстро развивается и распространяется дальше под пленкой краски. До настоящего времени фосфатирование в конденсаторной промышленности не получило широкого распространения. Стойкость лакокрасочного покрытия значительно улучшается с повышением температуры и удлинением срока сушки покрытых изделий и резко снижается при использовании шпаклевок.

Температура в помещении, где проводится окраска, должна быть не ниже  $+15^{\circ}\text{C}$ , а относительная влажность не выше 75 %.

При нанесении лакокрасочных материалов методом распыления с помощью сжатого воздуха, поступающий из сети воздух должен быть очищен от примесей воды и минерального масла.

При изготовлении металлобумажных конденсаторов в качестве покровного металла обычно используют свинцово-оловянный припой (Sn 40 %, Pb 60 %), нанося его методом горячего лужения.

Для наиболее ответственных случаев толщину покровного слоя увеличивают методом гальванического покрытия.

Лужение корпусов производят еще до сборки конденсаторов, что облегчает операцию припайки крышек. Луженые корпуса у готовых конденсаторов окрашивают. Для окраски конденсаторов широкое применение получила пентафталевая эмаль № 64К, выпускаемая в соответствии с техническими условиями № 4152-54.

Крышки конденсаторов, предназначенных для работы при высоких температурах, привариваются к корпусам, а потому лужение корпусов и крышек недопустимо. Для повышения противокоррозийной стойкости таких конденсаторов готовые конденсаторы подвергают фосфатированию, а затем окрашивают несколькими слоями эмали. В настоящее время для окраски таких конденсаторов принята эмаль А-14 ТУ МХП 2556-54.

Нанесение краски на изделия производится различными способами: кистью, окунанием, обычным распылением и, наконец, распылением в электростатическом поле. Для каждого из этих способов выбирается оптимальная вязкость краски, обеспечивающая нанесение слоя нужной толщины.

На заводах массового производства при нанесении краски методом распыления для получения направленного движения частиц краски на покрываемую поверхность изделия используют электростатическое поле. Распыляемые частицы краски заряжаются одним знаком и движутся к конденсаторам, находящимся под потенциалом другого знака. Этот способ обеспечивает значительную экономию краски (до 40—50 %) по сравнению с окраской распылением без электростатического поля.

Окрашенные конденсаторы направляются на сушку, которая является важной операцией процесса создания лакокрасочного покрытия.

Для сушки применяют различные виды оборудования:

1) Термостаты с электрическим или паровым обогревом и вытяжной вентиляцией. Такие термостаты обычно снабжаются автоматическими регуляторами температуры; сушка окрашенных конденсаторов в термостатах продолжается 2—3 часа.

2) Сушильные камеры с лампами инфракрасного излучения. Конденсаторы подвешиваются за лепестки на транспортер, который движется в вертикальном направлении, перемещая конденсаторы между лампами инфракрасного излучения. Высокие камеры, снабженные вытяжной вентиляцией, способствуют быстрому удалению растворителя. Сушка конденсаторов в таких камерах продолжается от 1 до 2 часов.

3) Установки высокочастотного нагрева корпусов. Этот метод сушки обычно применяют совместно с методом окраски в электростатическом поле. Теоретически это наиболее правильный метод сушки, поскольку обогрев начинается с корпусов и тепловой поток направлен в сторону движения паров растворителя. Благодаря этому происходит одновременное и равномерное высыхание по всей толщине пленки и более полное удаление паров растворителя. Сушка на таких установках продолжается не более одного часа.

---

## ГЛАВА ПЯТАЯ

### СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ МЕТАЛЛОБУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

#### § 31. Конденсаторы общего применения (тип МБГ)

Одним из первых типов металлобумажных конденсаторов, получивших широкое распространение в качестве конденсаторов общего применения, является тип МБГ — металлобумажные герметизированные. Конденсаторы типа МБГ были разработаны в 1951—1953 годах.

Герметизация этих конденсаторов осуществлена применением паяных металлических корпусов со стеклянными проходными изоляторами типа ИСШ и ИСК. Конденсаторы типа МБГ выпускают с номинальными напряжениями от 160 до 1500 в в плоских и цилиндрических корпусах, запаянных мягким припоем (ПОС-40).

Шкала номинальных напряжений, емкостей и габаритные размеры конденсаторов МБГ по отдельным номиналам приведены в табл. 13.

Плоские корпуса конденсаторов МБГ изготавливают холодной вытяжкой или же гибкой из листовой стали с последующей пайкой швов мягким или твердым припоем.

Для удобства монтажа в аппаратуре конденсаторы МБГ в плоских корпусах высотой 25 и 50 мм выпускают с тремя видами крепления (см. рис. 30).

Конденсаторы МБГ в цилиндрических корпусах, именуемые МБГЦ, выпускаются с одним или двумя изолированными выводами и называются соответственно МБГЦ-1 и МБГЦ-2.

Диэлектрик конденсаторов МБГ состоит из одного или нескольких слоев бумаги, при этом бумага, на которую наносится металл, лакируется этилцеллюлозным лаком. Пропитка секций конденсаторов МБГ производится церезином марки 80.

# Габаритные размеры конденсаторов МБГ Плоские корпуса

| Номинальная емкость, мкф | Номинальное напряжение, в |          |          |          |           |            |
|--------------------------|---------------------------|----------|----------|----------|-----------|------------|
|                          | 160                       | 200      | 250      | 400      | 600       | 1000       |
|                          | Размеры корпусов, мм      |          |          |          |           |            |
| 0,1                      | —                         | —        | —        | 11×31×25 | 11×31×25  | —          |
| 2×0,1                    | —                         | —        | —        | 11×31×25 | 16×31×25  | 16×46×50   |
| 0,25                     | —                         | —        | —        | —        | —         | —          |
| 2×0,25                   | —                         | —        | —        | —        | —         | —          |
| 0,5                      | —                         | 11×31×25 | —        | 16×31×25 | 31×31×25  | 26×46×50   |
| 2×0,5                    | 11×31×25                  | 11×31×25 | 26×31×25 | —        | —         | —          |
| 1                        | 11×31×25                  | 16×31×25 | 26×31×25 | 31×31×25 | 16×46×50  | 46×46×50   |
| 2                        | 21×31×25                  | 26×31×25 | 16×46×50 | 21×46×50 | 31×46×50  | 86×46×50   |
| 4                        | 31×31×25                  | 16×46×50 | 26×46×50 | 31×46×50 | 56×46×50  | 47×69×115  |
| 10                       | 21×46×50                  | 31×46×50 | 56×46×50 | 66×46×50 | 47×69×115 | 107×69×115 |
| 15                       | 31×46×50                  | 41×46×50 | —        | —        | —         | —          |
| 20                       | 41×46×50                  | —        | —        | —        | —         | —          |
| 25                       | —                         | 61×46×50 | —        | —        | —         | —          |
| 30                       | 61×46×50                  | —        | —        | —        | —         | —          |

## Цилиндрические корпуса

| Номинальная емкость, мкф | Номинальное напряжение, в |         |         |         |
|--------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|
|                          | 200                       | 400     | 600     | 1000    |
|                          | Размеры корпусов, мм d×L  |         |         |         |
| 0,025                    | —                         | —       | 11,5×38 | —       |
| 0,05                     | —                         | —       | 11,5×38 | 14,0×38 |
| 0,1                      | —                         | 11,5×38 | 14,0×38 | 18,5×38 |
| 0,25                     | 11,5×38                   | 18,5×50 | 18,5×50 | —       |
| 0,5                      | 14,0×38                   | 18,5×50 | —       | —       |
| 1                        | 18,5×38                   | —       | —       | —       |

Число слоев бумаги, средняя напряженность электрического поля, принятые в конденсаторах МБГ, а также максимальная рабочая температура приведены в табл. 14.

Таблица 14

**Толщина диэлектрика и средняя напряженность электрического поля в конденсаторах МБГ**

| Номинальное напряжение, в | Состав диэлектрика |                  |              | Общая толщина диэлектрика, мк | Средняя напряженность поля, кв/мм | Максимальная температура окружающего воздуха, °С |
|---------------------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
|                           | Бумага             |                  | Лаковый слой |                               |                                   |                                                  |
|                           | толщина мк         | количество слоев | толщина мк   |                               |                                   |                                                  |
| 160                       | 8                  | 1                | 1,2          | 9,2                           | 17,4                              | 60                                               |
| 200                       | 8                  | 1                | 2,4          | 10,4                          | 19,2                              | 70                                               |
| 250                       | 15                 | 1                | 1,2          | 16,2                          | 15,4                              | 60                                               |
| 400                       | 8                  | 2                | 1,2          | 17,2                          | 23,3                              | 70                                               |
| 600                       | 8                  | 3                | 1,2          | 25,2                          | 23,8                              | 70                                               |
| 1000                      | 10                 | 3                | 1,2          | 31,2                          | 32,0                              | 70                                               |
| 1500                      | 10                 | 4                | 1,2          | 41,2                          | 36,4                              | 70                                               |

Для конденсаторов с номинальным напряжением 160 и 250 в, имеющих в качестве диэлектрика один слой односторонне лакированной бумаги, максимальная рабочая температура ограничена значением 60° С, а для конденсаторов номинального напряжения 200 в, имеющих в качестве диэлектрика также один слой бумаги, но лакированной с двух сторон, максимальная температура увеличена до 70° С.

По допускаемому отклонению емкости от номинальной конденсаторы МБГ выпускаются трех классов: класс I с допускаемым отклонением  $\pm 5\%$ , класс II с допускаемым отклонением  $\pm 10\%$ , класс III с допускаемым отклонением  $\pm 20\%$ .

Изменение емкости конденсаторов при изменении температуры определяется, главным образом, природой диэлектрика, а поэтому температурные изменения емкости металлобумажных конденсаторов должны быть подобны температурным изменениям емкости бумажных конденсаторов, пропитанных церезином. Некоторые различия могут иметь место только за счет влияния лакового слоя, что

в большей степени должно проявляться в однослойных металlobумажных конденсаторах.

На рис. 58 приведена зависимость емкости конденсаторов МБГ от температуры для образцов с однослойным и многослойным диэлектриком. При повышении температуры от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $50^{\circ}\text{C}$  емкость увеличивается на 2—3%. При дальнейшем повышении температуры емкость снижается и при  $70^{\circ}\text{C}$  составляет от 94 до 98% от емкости, измеренной при  $20^{\circ}\text{C}$ . При снижении температуры ем-

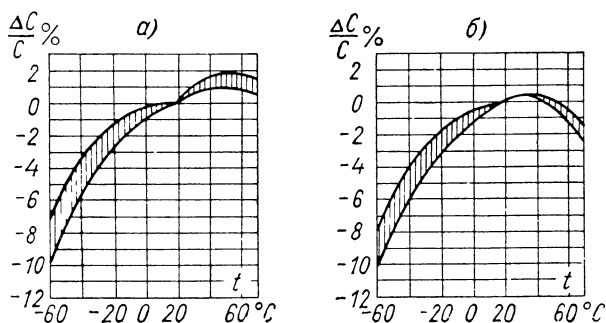


Рис. 58. Зависимость емкости конденсаторов МБГ от температуры при частоте 800 гц: *а* — однослойные конденсаторы; *б* — многослойные конденсаторы (Морозов).

кость конденсаторов МБГ падает и при  $-60^{\circ}\text{C}$  составляет от 87 до 92% от исходного значения при комнатной температуре.

Тангенс угла потерь металlobумажных конденсаторов типа МБГ обычно ниже 0,01 и весьма близок к значению  $\tan \delta$  для бумажных конденсаторов с фольговыми обкладками.

Зависимость тангенса угла потерь конденсаторов МБГ от температуры при частоте 800 гц приведена на рис. 59. Небольшое возрастание тангенса угла потерь с температурой в интервале выше  $40$ — $50^{\circ}$  связано с увеличением проводимости диэлектрика. При понижении температуры от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $-60^{\circ}\text{C}$  тангенс угла потерь также возрастает и при  $-60^{\circ}\text{C}$  достигает значений 0,02—0,04. Рост тангенса угла потерь металlobумажных конденсаторов при понижении температуры объясняется возрастанием диэлектрических потерь в бумаге в области отрицательных температур.

Зависимость тангенса угла потерь конденсаторов МБГ от частоты в интервале от 100 гц до 20 кгц приведена на рис. 60 и показывает заметный рост  $\operatorname{tg} \delta$  с повышением ча-

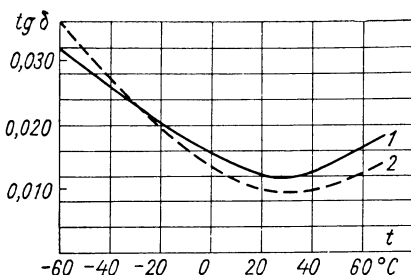


Рис. 59. Зависимость угла потерь конденсаторов МБГ от температуры

1 — однослойные конденсаторы; 2 — многослойные конденсаторы (Морозов).

стоты. Это явление обусловлено ростом диэлектрических потерь бумаги при повышенных частотах, а так же влиянием сопротивления обкладок и выводов, которое усили-

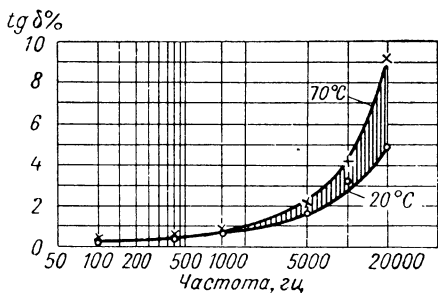


Рис. 60. Зависимость угла потерь конденсаторов МБГ (0,5 мкф, 160 в) от частоты в интервале температур 20—70° С (Морозов).

вается с ростом частоты. Постоянная времени (т. е. произведение из сопротивления изоляции на емкость) для конденсаторов МБГ нормируется в зависимости от состава диэлектрика и числа слоев бумаги.

Для конденсаторов с одним слоем односторонне лакированной бумаги (номинальные напряжения 160 в и 250 в)

минимальное значение постоянной времени установлено равным 200 *Мом·мкф*; для конденсаторов с одним слоем двусторонне лакированной бумаги ( $U_{ном} = 200$  в) ( $RC$ )<sub>мин</sub> составляет 300 *Мом·мкф*, а для конденсаторов с двумя и более слоями бумаги ( $U_{ном} \geq 400$  в) принята норма 1000 *Мом·мкф*.

Такое различие в требованиях к величине постоянной времени объясняется тем, что, несмотря на введение лакирования бумаги и тренировку секций металлобумажных конденсаторов, не удается получить высоких и стабильных значений сопротивления изоляции у однослойных конденсаторов; в то же время диэлектрик, состоящий из нескольких слоев бумаги, обеспечивает получение более высоких значений этой характеристики, приближающихся к тем, которые можно получать у обычных бумажных конденсаторов с обкладками из фольги.

В табл. 15 приведены средние и максимальные значения постоянной времени для конденсаторов типа МБГ, определенные на больших производственных партиях.

Постоянная времени однослойных конденсаторов может изменяться для различных экземпляров в 20 и более раз, в то время как для многослойных конденсаторов колебания этой характеристики не выходят за пределы 10 раз.

Кроме того, на отдельных образцах однослойных конденсаторов наблюдается снижение сопротивления изоляции в процессе хранения или эксплуатации при повышенных температурах, в то время как на образцах с многослойным диэлектриком такого явления не наблюдается.

При повышении температуры постоянная времени конденсаторов МБГ снижается (рис. 61). Зависимость постоянной времени от температуры достаточно хорошо выражается формулой:

$$(RC)_t = (RC)_0 e^{-\alpha(t-t_0)}. \quad (33)$$

Таблица 15

**Зависимость постоянной времени конденсаторов МБГ от номинального напряжения**

| Номинальное напряжение, в | Постоянная времени, <i>Мом·мкф</i> |                       |                               |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
|                           | среднее значение                   | максимальные значения | норма по техническим условиям |
| 160 и 250                 | 300                                | 4 000                 | 200                           |
| 200                       | 1200                               | 6 000                 | 300                           |
| 400 в                     | 3000                               | 18 000                | 1000                          |
| и выше                    |                                    |                       |                               |

Коэффициент  $\alpha$ , определяющий снижение постоянной времени с повышением температуры, для многослойных конденсаторов отличается от его значения для однослойных. Для многослойных  $\alpha = 0,086$ , для однослойных, в среднем,  $\alpha = 0,075$ .

Электрическая прочность металlobумажных конденсаторов, как указывалось выше, значительно отличается от электрической прочности бумажных конденсаторов с фольговыми обкладками.

В бумажных конденсаторах с фольговыми обкладками минимальное напряжение, воздействие которого в течение короткого времени нарушает электрическую прочность диэлектрика, называют пробивным напряжением.

В металlobумажных конденсаторах, в том числе и МБГ, не удастся отметить такого минимального напряжения, которое при кратковременном приложении нарушило бы электрическую прочность ди-

электрика, так как пробой на отдельных участках диэлектрика автоматически приводит к отключению этих участков; при этом конденсатор почти не меняет своих характеристик.

Если к выводам металlobумажного конденсатора приложено напряжение, достаточное для нарушения электрической прочности в слабом месте диэлектрика, то произойдет пробой. При каждом пробое происходит разрушение обкладки вокруг места пробоя, в связи с чем конденсатор «самовосстанавливается».

Таким образом, после каждого пробоя электрическая прочность металlobумажного конденсатора восстанавливается отключением пробитых мест, являющихся наиболее слабыми участками диэлектрика. Вместе с тем в процессе повышения напряжения и пробоя происходит подготовка к пробую на других участках диэлектрика. Поэтому, если после первых пробоев электрическая прочность металло-

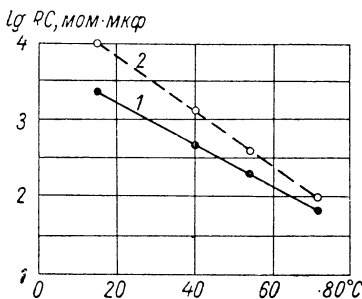


Рис. 61. Зависимость постоянной времени конденсаторов МБГ от температуры

1 — однослойные конденсаторы; 2 — многослойные конденсаторы (Скрипкин, Торошин).

бумажных конденсаторов повышается, то при большом количестве пробоев может наблюдаться и снижение электрической прочности. Изменение электрической прочности металлобумажных конденсаторов в зависимости от числа пробоев показано на рис. 11.

Характер этого изменения зависит от толщины обкладок и толщины диэлектрика. В конденсаторах, имеющих толстые обкладки, происходят более значительные разрушения диэлектрика при каждом отдельном пробое и поэтому они выдерживают без снижения электрической прочности меньшее число пробоев.

Приведенные на рис. 11 кривые показывают, что конденсаторы МБГ  $U_{\text{ном}} 160$  в емкостью  $30$  мкф с обкладками, имеющими электропроводность  $1,2$  ом<sup>-1</sup>, без снижения электрической прочности выдерживают около 800 пробоев, а аналогичные конденсаторы, но с обкладками меньшей толщины и имеющими электропроводность  $0,3$  ом<sup>-1</sup>, выдерживают около 7000 пробоев.

Металлобумажные конденсаторы с диэлектриком увеличенной толщины выдерживают значительно меньше пробоев, чем с тонким, так как толстый диэлектрик пробивается при высоких напряжениях, при которых каждый отдельный пробой связан с выделением большего количества энергии, приводящего к значительным разрушениям диэлектрика.

Так, конденсаторы МБГ с обкладками, имеющими электропроводность  $0,2—0,5$  ом<sup>-1</sup> при толщине диэлектрика  $41$  мк (номинальное напряжение  $1500$  в), выдерживают всего  $40—60$  пробоев.

Металлобумажные конденсаторы типа МБГ с многослойным диэлектриком допускают без нарушения герметичности эксплуатацию в интервале температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ . Конденсаторы МБГ с однослойным диэлектриком и односторонней лакировкой бумаги допускают эксплуатацию при температуре до  $+60^{\circ}\text{C}$ , а при двухсторонней лакировке бумаги до  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Увеличение температуры эксплуатации однослойных конденсаторов, кроме нарушения герметичности, приводит также к недопустимо резкому снижению сопротивления изоляции отдельных образцов. Следовательно, для эксплуатации при более высоких температурах необходимо пользоваться металлобумажными конденсаторами с многослойной изоляцией, имеющими более надежную заделку

корпуса (например, в сварных корпусах); на этом принципе создана серия высокотемпературных конденсаторов МБГТ.

Металлобумажные конденсаторы могут эксплуатироваться на постоянном токе с наложением переменной составляющей, о чем в технических условиях обычно имеется указание. Величина переменной составляющей указывается в процентах от номинального напряжения; при этом сумма постоянной составляющей и амплитуды переменной не должна превышать номинального напряжения. Допустимость эксплуатации конденсаторов в импульсном режиме обычно не оговаривается или же только указывается на возможность такого применения, но без указания параметров импульсного тока.

Следует также заметить, что испытания металлобумажных конденсаторов обычно проводят с наложением синусоидальной переменной составляющей.

Исследования, проведенные А. К. Герцик на конденсаторах с бумажным диэлектриком и обкладками из фольги, показали, что воздействие на конденсатор напряжения искаженной формы не вызывает особенно существенных изменений в диэлектрике, в сравнении с воздействием чисто синусоидального напряжения.

\* Однако особенности конструкции металлобумажного конденсатора заставляют накладывать известные ограничения по максимальному значению тока в импульсном режиме. Выводы и обкладки конденсатора не всегда в состоянии пропустить те большие токи, которые могут иметь место при импульсном режиме работы, допустимом по величине максимального напряжения, но характеризующимся наличием крутого фронта волны напряжения.

Металлобумажные конденсаторы с тонкими обкладками особенно чувствительны к перегрузкам по току. При большой плотности тока обкладки оплавляются в местах контактирования, выводы отсоединяются от обкладок и конденсатор теряет емкость. Поэтому в последнее время в технические условия на металлобумажные конденсаторы постоянного тока вводят указания об ограничении допустимого значения импульсного тока, который не должен превышать более чем в 8—10 раз значение тока, соответствующее допускаемому амплитудному значению переменной составляющей синусоидального тока.

## § 32. Конденсаторы для расширенного интервала рабочих температур

Для работы при повышенных температурах выпускается специальный тип металлобумажных конденсаторов — МБГТ (металлобумажные герметизированные теплостойкие).

Конденсаторы МБГТ изготавливают в плоских стальных корпусах со сварными швами. Выводы в этих конденсаторах осуществлены с помощью стеклокерамических изоляторов типа ИКПТ (см. рис. 32), впаянных твердым припоем. Конденсаторы МБГТ выпускают для рабочих напряжений от 160 до 1000 в.

Шкала номинальных напряжений, емкостей и размеры конденсаторов МБГТ по отдельным номиналам приведены в табл. 16.

Таблица 16

Габаритные размеры конденсаторов МБГТ

| Номинальная емкость, мкф | Номинальное напряжение, в                      |          |           |           |            |
|--------------------------|------------------------------------------------|----------|-----------|-----------|------------|
|                          | 160                                            | 300      | 500       | 750       | 1000       |
|                          | Размеры корпусов, мм ( $L \times B \times H$ ) |          |           |           |            |
| 0,1                      |                                                |          |           | 17×30×30  | 30×30×30   |
| 0,25                     |                                                |          | 17×30×30  | 30×30×30  | 17×45×54   |
| 0,5                      |                                                | 17×30×30 | 30×30×30  | 17×45×54  | 25×45×54   |
| 1                        | 17×30×30                                       | 30×30×30 | 20×45×54  | 25×45×54  | 45×45×54   |
| 2                        | 30×30×30                                       | 17×45×54 | 30×45×54  | 50×45×54  | 85×45×54   |
| 4                        | 20×45×54                                       | 30×45×54 | 60×45×54  | 30×65×115 | 45×65×115  |
| 10                       | 45×45×54                                       | 65×45×54 | 45×65×115 | 60×65×115 | 105×65×115 |
| 20                       | 80×45×54                                       |          |           |           |            |

Специальных крепежных планок конденсаторы МБГТ не имеют и крепление их осуществляется с помощью скоб.

Диэлектрик конденсаторов МБГТ состоит не менее чем из двух слоев бумаги, при этом бумага, на которую наносится металл, лакируется этилцеллюлозным лаком.

Пропитка секций конденсаторов МБГТ, так же как и в случае конденсаторов МБГ, производится церезином марки 80.

Число слоев бумаги и величина номинальной напряженности поля при температуре 100° С, принятые в конденсаторах МБГТ, приведены в табл. 17.

Поскольку конденсаторы МБГТ имеют более надежную герметизацию чем МБГ и при всех напряжениях в них

применен многослойный диэлектрик, они могут работать при температурах до  $100^{\circ}\text{C}$ .

Конденсаторы МБГТ выпускают трех классов точности с допускаемыми отклонениями емкости от номинальной, равными  $\pm 5$ ;  $\pm 10$  и  $\pm 20\%$ .

Таблица 17

Толщина диэлектрика и средняя напряженность электрического поля в конденсаторах МБГТ

| Номинальное напряжение, в | Состав диэлектрика |                    |                           |                               | Средняя напряженность поля, кв/мм |
|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
|                           | толщина бумаги, мк | число слоев бумаги | толщина лакового слоя, мк | общая толщина диэлектрика, мк |                                   |
| 160                       | 6                  | 2                  | 1,2                       | 13,2                          | 12,1                              |
| <del>250</del>            | 8                  | 2                  | 1,2                       | 17,2                          | 14,5                              |
| 500                       | 8                  | 3                  | 1,2                       | 25,2                          | 19,8                              |
| 750                       | 10                 | 3                  | 1,2                       | 31,2                          | 24,0                              |
| 1000                      | 10                 | 4                  | 1,2                       | 41,2                          | 24,3                              |

Норма на постоянную времени для конденсаторов МБГТ такая же, как для многослойных МБГ, т. е. не ниже  $1000 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ ; тангенс угла потерь при частоте  $50 \text{ гц}$  не должен превышать  $0,015$ .

По изменению электрических характеристик конденсаторы МБГТ в интервале температур от  $-60$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  аналогичны многослойным конденсаторам МБГ, поскольку ни по диэлектрику, ни по обкладкам не отличаются от последних. Поэтому остановимся только на изменении электрических характеристик при температурах выше  $70^{\circ}\text{C}$  (рис. 62).

При повышении температуры от  $70$  до  $100^{\circ}\text{C}$  происходит снижение емкости на  $2-5\%$ ; в то же время тангенс угла потерь продолжает возрастать и при частоте  $1000 \text{ гц}$  при  $100^{\circ}\text{C}$  достигает значения  $0,025-0,040$  ( $2,5-4\%$ ).

Характер изменения постоянной времени сохраняется тем же, что и при повышении температуры в пределах от  $40$  до  $70^{\circ}\text{C}$ , поэтому формула, приведенная для многослойных конденсаторов МБГ, правильно отражает изменение постоянной времени и конденсаторов МБГТ в пределах до  $100^{\circ}\text{C}$ .

При температуре  $100^{\circ}\text{C}$  постоянная времени для конденсаторов МБГТ, измеренная при напряжении  $100\text{ в}$  на образцах с двухслойным диэлектриком, должна быть не

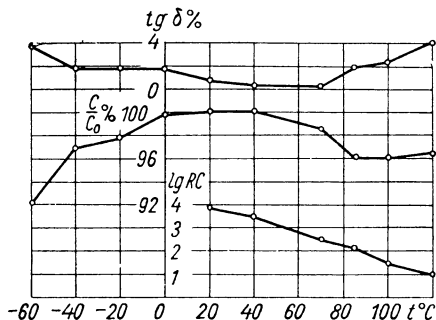


Рис. 62. Зависимость емкости, угла потерь и постоянной времени конденсаторов МБГТ от температуры (Торошин).

ниже  $5\text{ Мом} \cdot \text{мкф}$  и не ниже  $12\text{ Мом} \cdot \text{мкф}$  для конденсаторов с диэлектриком из трех и более слоев бумаги.

На рис. 63 приведено изменение постоянной времени в зависимости от температуры при нескольких значениях

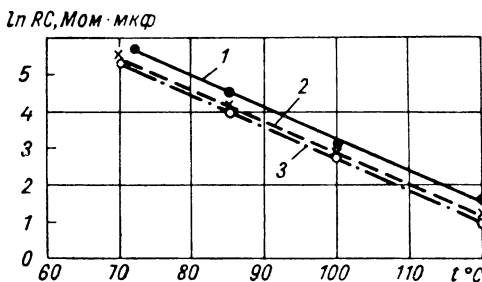


Рис. 63. Зависимость постоянной времени конденсаторов МБГТ от температуры при различной напряженности поля

1— $25\text{ кВ/мм}$ ; 2— $30\text{ кВ/мм}$ ; 3— $32\text{ кВ/мм}$  (Торошин).

напряженности поля. Как показывает этот рисунок, характер зависимости постоянной времени от температуры сохраняется при изменении напряженности поля в пределах от  $25$  до  $32\text{ кВ/мм}$ . Следовательно, формула (33) справед-

лива для металlobумажных конденсаторов и при высоких напряженностях поля, если не возникает условий для развития самопроизвольного разогрева конденсаторов.

Как видно из рис. 63, с повышением напряженности поля постоянная времени снижается. Эта зависимость представлена более наглядно на рис. 64, где изменение

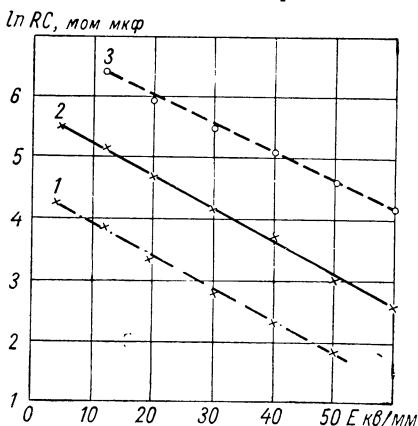


Рис. 64. Зависимость постоянной времени конденсаторов МБГТ от напряженности поля при различных температурах

1—при  $100^\circ\text{C}$ ; 2—при  $85^\circ\text{C}$ ; 3—при  $70^\circ\text{C}$ .  
(Торошин)

постоянной времени при увеличении напряженности поля приведено для различных температур.

Эту зависимость можно выразить уравнением:

$$(RC)_E = (RC)_0 e^{-\beta (E-E_0)}. \quad (34)$$

Коэффициент  $\beta$  может быть получен из рис. 64, и его среднее значение для конденсаторов МБГТ равно 0,045.

Пользуясь уравнениями 22 и 23, можно выразить зависимость постоянной времени от температуры и напряженности поля в виде одного общего уравнения:

$$RC = (RC)_0 e^{-[\alpha (t-t_0) + \beta (E-E_0)]}, \quad (35)$$

где  $(RC)_0$  — постоянная времени при температуре  $t_0$  и напряженности  $E_0$ .

Пользуясь этим уравнением, можно определить величину постоянной времени при различных значениях тем-

пературы и напряженности поля, если известна ее величина при некоторых исходных значениях  $t_0$  и  $E_0$ .

Изменение электрических характеристик конденсаторов МБГТ в процессе длительной эксплуатации при температуре  $100^\circ\text{C}$  показано на рис. 65. Как видно из приведенных на рисунке кривых, сопротивление изоляции в начале испытания незначительно снижается. При дальнейших

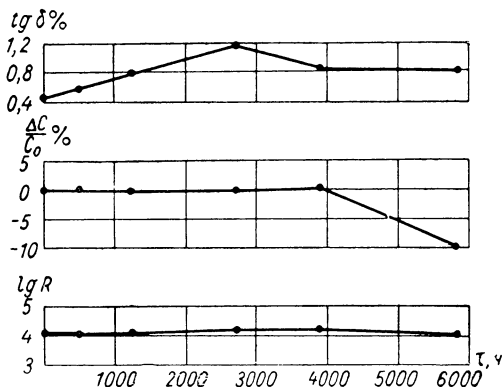


Рис. 65. Зависимость электрических характеристик конденсаторов МБГТ от времени эксплуатации при температуре  $100^\circ\text{C}$  и напряженности поля  $26,8 \text{ кВ/мм}$  (Торошин).

испытаниях происходит постепенное повышение сопротивления и обычно через 600—800 часов оно достигает первоначального значения.

Емкость в начале испытаний незначительно (на 1—3%) снижается, после чего конденсаторы длительное время работают без существенного изменения емкости.

После 4000—5000 часов обычно начинается новое снижение емкости, вызванное разрушением обкладок. Это снижение емкости практически и ограничивает срок службы таких конденсаторов.

Тангенс угла потерь длительное время не изменяется, но после 4000—5000 часов начинается постепенное его возрастание, вызванное разрушением обкладок, связанным с повышением их электрического сопротивления.

Сопоставление табл. 14 и 17 показывает, что напряженность поля в конденсаторах МБГТ ниже, чем в МБГ; это объясняется тем, что номинальные напряжения для кон-

денсаторов МБГ были установлены для температуры  $70^{\circ}\text{C}$ , а для конденсаторов МБГТ для более высокой температуры:  $100^{\circ}\text{C}$ . Конденсаторы МБГТ могут эксплуатироваться и при температурах ниже  $100^{\circ}\text{C}$ , причем в этом случае рабочее напряжение без риска пробоя изоляции может превышать номинальное. Поэтому технические условия на конденсаторы МБГТ предусматривают возможность эксплуатации

Таблица 18

**Допустимые рабочие напряжения для конденсаторов МБГТ при различных температурах**

| $U_{\text{ном}}, \text{ в}$<br>(до $100^{\circ}\text{C}$ ) | Допустимые рабочие напряжения при температурах, $\text{ в}$ |                         |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|
|                                                            | до $85^{\circ}\text{C}$                                     | до $70^{\circ}\text{C}$ |
| 160                                                        | 250                                                         | 300                     |
| 300                                                        | 500                                                         | 600                     |
| 500                                                        | 750                                                         | 900                     |
| 750                                                        | 1000                                                        | 1300                    |
| 1000                                                       | 1300                                                        | 1800                    |

их при температурах  $85^{\circ}\text{C}$  и ниже при напряжениях выше номинальных. П. А. Торощиным были проведены испытания этих конденсаторов при температуре  $70^{\circ}\text{C}$ . Результаты испытаний показали возможность дополнительного повышения рабочего напряжения, если окружающая температура будет не больше  $70^{\circ}\text{C}$ .

В табл. 18 приведены допустимые рабочие напряжения для конденсаторов МБГТ, соответствующие максимальным значениям рабочей температуры  $85^{\circ}\text{C}$  и  $70^{\circ}\text{C}$ .

Кратковременную эксплуатацию конденсаторов МБГТ, по-видимому, можно допускать и при температуре выше  $100^{\circ}\text{C}$ , но в этом случае рабочее напряжение должно быть значительно ниже номинального, а срок службы не должен превышать 100—150 часов. Подробнее условия эксплуатации металлобумажных конденсаторов будут рассмотрены в главе шестой.

### § 33. Однослойные конденсаторы уменьшенных габаритов для облегченных условий эксплуатации (тип МБГО)

Исследования, проведенные по изучению процесса самовосстановления электрической прочности металлизированной бумаги, позволили сделать вывод о возможности разработки однослойных металлобумажных конденсаторов для более высоких напряжений, чем это было принято для типа МБГ. Кроме того, было показано, что при облегченных условиях работы допускаемая напряженность

поля в однослойных конденсаторах может быть несколько увеличена.

Конденсаторы с диэлектриком, состоящим из одного слоя лакированной и металлизированной бумаги, пропитанной церезином, разработаны для номинальных напряжений от 160 до 600 в. Этим конденсаторам присвоено наименование МБГО — металlobумажные герметизированные однослойные.

Толщина диэлектрика и напряженность электрического поля для принятых в этой серии конденсаторов значений номинальных рабочих напряжений приведены в табл. 19.

Таблица 19

**Толщина диэлектрика и средняя напряженность электрического поля в конденсаторах типа МБГО**

| Номинальное рабочее напряжение, в | Толщина бумаги, мк | Толщина лака, мк | Общая толщина диэлектрика, мк | Средняя напряженность поля, кв/мм |
|-----------------------------------|--------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 160                               | 6                  | 1,2              | 7,2                           | 22,2                              |
| 300                               | 8                  | 1,2              | 9,2                           | 32,6                              |
| 400                               | 10                 | 1,2              | 11,2                          | 35,7                              |
| 500                               | 12                 | 1,2              | 13,2                          | 37,9                              |
| 600                               | 15                 | 1,2              | 16,2                          | 37,0                              |

В конденсаторах с номинальными рабочими напряжениями 500 и 600 в имеется возможность использовать двухслойный диэлектрик с теми же значениями толщины. Это привело бы к улучшению электрических характеристик конденсаторов и повысило бы их надежность в эксплуатации. Однако применение двух слоев очень тонких бумаг приводит к значительному повышению стоимости конденсаторов; кроме того, нецелесообразно в одной и той же серии иметь конденсаторы различной надежности. Поэтому у конденсаторов типа МБГО при всех напряжениях применен однослойный диэлектрик.

Конденсаторы МБГО выпускают в плоских металлических корпусах со стеклянными изоляторами типа ИСПШ.

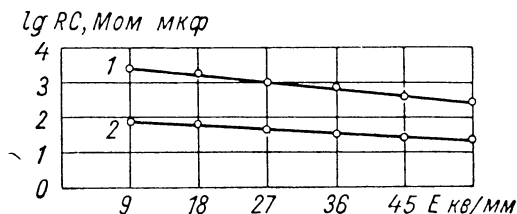
Шкала номинальных емкостей и размеры конденсаторов МБГО для всех номиналов приведены в табл. 20.

Основные электрические характеристики конденсаторов МБГО в нормальных условиях не отличаются от харак-

**Шкала номинальных емкостей и габаритные размеры  
конденсаторов МБГО**

| Номинальное<br>значение ем-<br>кости, мкф | Номинальное напряжение, в |          |          |          |          |
|-------------------------------------------|---------------------------|----------|----------|----------|----------|
|                                           | 160                       | 300      | 400      | 500      | 600      |
|                                           | Размеры конденсаторов, мм |          |          |          |          |
| 0,25                                      |                           |          |          |          | 11×31×25 |
| 0,5                                       |                           |          |          |          | 16×31×25 |
| 1                                         |                           | 11×31×25 | 16×31×25 | 21×31×25 | 26×31×25 |
| 2                                         | 16×31×25                  | 21×31×25 | 26×31×25 | 11×46×50 | 16×46×50 |
| 4                                         | 21×31×25                  | 11×46×50 | 16×46×50 | 21×46×50 | 26×46×50 |
| 10                                        | 16×46×50                  | 21×46×50 | 31×46×50 | 41×46×50 | 56×46×50 |
| 20                                        | 31×46×50                  | 41×46×50 | 61×46×50 | 76×46×50 |          |
| 30                                        | 41×46×50                  | 56×46×50 |          |          |          |

теристик однослойных конденсаторов МБГ, и технические условия содержат одни и те же требования по величине постоянной времени и тангенса угла потерь. Как было указано выше, в конденсаторах МБГО, по сравнению с одно-



**Рис. 66. Зависимость постоянной времени кон-  
денсаторов МБГО от напряженности поля**

1 — при температуре 20° С; 2 — при 70° С  
(Торошин).

слойными конденсаторами МБГ, приняты более высокие значения рабочей напряженности поля (см. табл. 14 и 20).

На рис. 66 приведено изменение постоянной времени от напряженности поля при температурах 20° С и 70° С. Данные этого рисунка показывают, что в металлобумажных конденсаторах с однослойным диэлектриком при напряжениях поля до 50 кВ/мм еще не происходит резкого снижения постоянной времени.

Изменение электрических характеристик конденсаторов МБГО в зависимости от времени испытания при темпе-

ратуре  $+60^{\circ}\text{C}$  показано на рис. 67. Из кривых, приведенных на рисунке, видно, что изменение емкости и тангенса угла потерь в процессе длительных испытаний конденсаторов МБГО незначительно, в то время как постоянная времени заметно снижается. Отдельные образцы снижают постоянную времени до 1—2  $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$ .

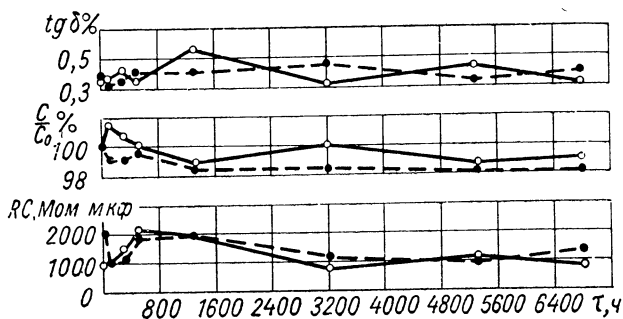


Рис. 67. Зависимость электрических характеристик конденсаторов МБГО (30 мкф, 300 в) от времени их эксплуатации при  $60^{\circ}\text{C}$  и номинальном напряжении (сплошные кривые) и при их хранении при  $60^{\circ}\text{C}$  без воздействия напряжения (пунктир) (Торошин).

Поскольку однослойные металлобумажные конденсаторы имеют малую стабильность сопротивления изоляции во времени, их не рекомендуется применять в тех случаях, где требуется высокая постоянная времени. По тем же соображениям конденсаторы МБГО не рекомендуется применять при температурах выше  $60^{\circ}\text{C}$ , так как с повышением температуры количество образцов, резко снижающих сопротивление изоляции, заметно возрастает.

### § 34. Малогабаритные металлобумажные конденсаторы малой емкости (тип МБМ)

В герметизированных конденсаторах малой емкости значительную часть общего объема занимают вспомогательные конструктивные элементы, не участвующие непосредственно в создании емкости: изоляция пакета секций от корпуса, выводные изоляторы и т. п. Если в конденсаторах большой емкости такие элементы занимают 15—30% общего объема, то в конденсаторах малой емкости эта часть

объема дополнительно увеличивается и достигает 50—60%. Например, конденсатор с емкостью 30 мкф на 160 в имеет общий объем 140 см<sup>3</sup> при объеме пакета секций 102 см<sup>3</sup> (непроизводительный объем 27% от общего объема), а при том же напряжении конденсатор емкостью 1 мкф имеет объем 8,6 см<sup>3</sup> при объеме пакета 4,3 см<sup>3</sup> (непроизводитель-

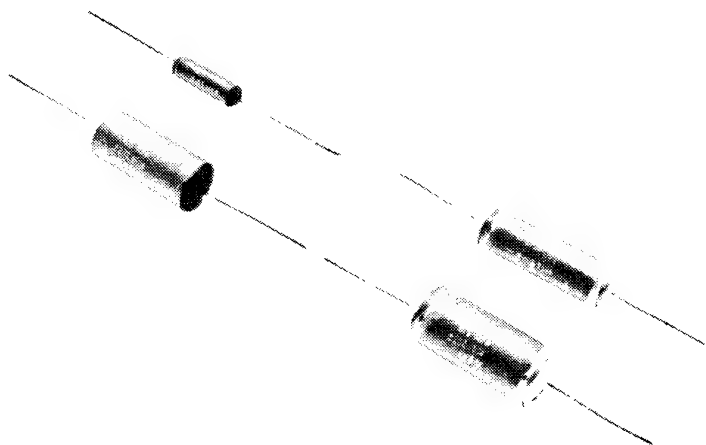


Рис. 68. Внешний вид конденсаторов МБМ

слева — уплотненные эпоксидной смолой; справа — уплотненные резиной.

ный объем занимает 50%). Поэтому вопрос о снижении непроизводительных объемов у конденсаторов малой емкости является особенно актуальным при решении проблемы улучшения удельных характеристик.

Наиболее полное решение этого вопроса было получено при разработке конденсаторов МБМ. Эти конденсаторы выпускают в цилиндрических корпусах, уплотненных эпоксисмолой или резиной, которые одновременно служат и изоляцией вывода из корпуса (рис. 68). Диэлектриком этих конденсаторов является конденсаторная бумага в один или несколько слоев, пропитанная церезином.

Габаритные размеры конденсаторов МБМ для отдельных номиналов приведены в табл. 21.

## Габаритные размеры конденсаторов МБМ

| Номиналь-<br>ная емкость,<br>мкф | Номинальное напряжение, в |    |     |    |     |    |     |    |      |    |      |    |
|----------------------------------|---------------------------|----|-----|----|-----|----|-----|----|------|----|------|----|
|                                  | 160                       |    | 250 |    | 500 |    | 750 |    | 1000 |    | 1500 |    |
|                                  | Размеры корпусов, мм      |    |     |    |     |    |     |    |      |    |      |    |
|                                  | d                         | l  | d   | l  | d   | l  | d   | l  | d    | l  | d    | l  |
| 0,0051                           |                           |    |     |    |     |    |     |    |      |    | 8,5  | 34 |
| 0,01                             |                           |    |     |    |     |    | 8,5 | 20 | 8,5  | 34 | 11   | 34 |
| 0,025                            |                           |    |     |    | 8,5 | 20 | 8,5 | 34 | 11   | 34 | 14   | 34 |
| 0,05                             | 6                         | 20 | 8,5 | 20 | 8,5 | 34 | 11  | 34 | 14   | 34 | 14   | 48 |
| 0,1                              | 8,5                       | 20 | 8,5 | 34 | 11  | 34 | 14  | 34 | 16   | 34 | 20   | 48 |
| 0,25                             | 8,5                       | 34 | 11  | 34 | 14  | 34 | 16  | 48 |      |    |      |    |
| 0,5                              | 11                        | 34 | 16  | 34 | 16  | 48 |     |    |      |    |      |    |
| 1                                | 14                        | 34 | 18  | 48 |     |    |     |    |      |    |      |    |

Номинальное напряжение для этих конденсаторов установлено для интервала температур от  $-60$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  при длительном сроке службы. В случае эксплуатации конденсаторов при более высоких температурах или в установках с малым сроком службы рабочее напряжение может значительно отличаться от номинального, но не должно превышать значений, указанных в табл. 22.

Конденсаторы с номинальным напряжением 160 в выпускают с диэлектриком в один слой бумаги, поэтому они не рекомендуются для работы при температуре выше  $70^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 22

## Допустимые рабочие напряжения для конденсаторов МБМ при различных температурах и сроках службы

| Номинальное<br>напряжение,<br>в | Срок службы, ч                      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                                 | 5000                                |      | 500  |      |      | 50   |      |
|                                 | Температура окружающего воздуха, °С |      |      |      |      |      |      |
|                                 | 70                                  | 85   | 70   | 85   | 100  | 85   | 100  |
|                                 | Допустимое рабочее напряжение, в    |      |      |      |      |      |      |
| 160                             | 160                                 | —    | 200  | —    | —    | —    | —    |
| 250                             | 250                                 | 160  | 300  | 250  | 160  | 300  | 200  |
| 500                             | 500                                 | 300  | 600  | 500  | 300  | 600  | 400  |
| 750                             | 750                                 | 600  | 850  | 750  | 500  | 850  | 650  |
| 1000                            | 1000                                | 800  | 1200 | 1000 | 750  | 1200 | 900  |
| 1500                            | 1500                                | 1200 | 1800 | 1500 | 1000 | 1700 | 1200 |

Приведенная таблица допустимых рабочих напряжений позволяет рационально использовать конденсаторы МБМ в различных условиях эксплуатации.

Электрические характеристики определяются физическими свойствами диэлектрика, поэтому для конденсаторов МБМ номинального напряжения 160 в они не отличаются от характеристик однослойных металlobумажных конденсаторов типа МБГ; конденсаторы с более высокими номинальными напряжениями, имеющие многослойную изоляцию, не отличаются от многослойных конденсаторов МБГ.

Недостатком конденсаторов МБМ является их недостаточно надежная защита от воздействия влаги.

Уплотнение из эпоксидной смолы не всегда надежно защищает секции от воздействия влаги. Часть образцов при длительном хранении ухудшает свои характеристики вследствие проникновения влаги, а отбраковать такие образцы при изготовлении не удастся, так как влага проникает не только по сквозным отверстиям, образовавшимся при заливке, но также и через участки слоя эпоксидной смолы, имеющие уменьшенную толщину, но еще не образующие сквозных пор.

Конденсаторы МБМ, уплотненные резиной, при длительном хранении также ухудшают свои характеристики, так как резина при хранении стареет, что выражается в потере эластичности и образовании трещин. В результате таких изменений в свойствах резины нарушается герметичность заделки корпуса и влага проникает в секцию. Лишены этого недостатка вновь разработанные герметизированные цилиндрические конденсаторы типа К42У-2.

### **§ 35. Герметизированные малогабаритные конденсаторы малой емкости (тип К42У-2)**

Малогабаритные металlobумажные конденсаторы малой емкости выпускают также и с вакуумплотной конструкцией. Таким конденсаторам присвоено условное обозначение К42У-2.

Шкала номинальных емкостей и габаритные размеры конденсаторов К42У-2 приведены в табл. 23.

Электрические характеристики конденсаторов К42У-2 существенно не отличаются от характеристик конденсаторов МБМ, но более стабильны в условиях воздействия влажности.

Габаритные размеры конденсаторов К42У-2

| Номиналь-<br>ная<br>емкость,<br>мкф | Номинальное напряжение, в |    |     |    |     |    |     |    |      |    |      |    |
|-------------------------------------|---------------------------|----|-----|----|-----|----|-----|----|------|----|------|----|
|                                     | 160                       |    | 250 |    | 400 |    | 630 |    | 1000 |    | 1600 |    |
|                                     | Размеры конденсаторов, мм |    |     |    |     |    |     |    |      |    |      |    |
|                                     | d                         | l  | d   | l  | d   | l  | d   | l  | d    | l  | d    | l  |
| 0,0047                              |                           |    |     |    |     |    |     |    |      |    | 8    | 32 |
| 0,0068                              |                           |    |     |    |     |    |     |    |      |    | 9    | 32 |
| 0,01                                |                           |    |     |    |     |    | 6   | 23 | 9    | 23 | 10   | 32 |
| 0,015                               |                           |    |     |    |     |    | 8   | 23 | 9    | 32 | 12   | 32 |
| 0,022                               |                           |    |     |    | 6   | 23 | 9   | 23 | 10   | 32 | 12   | 38 |
| 0,033                               |                           |    |     |    | 8   | 23 | 8   | 32 | 10   | 32 | 14   | 38 |
| 0,047                               | 6                         | 23 | 8   | 23 | 8   | 23 | 10  | 32 | 11   | 38 | 16   | 38 |
| 0,068                               | 6                         | 23 | 8   | 32 | 8   | 32 | 11  | 32 | 12   | 38 | 16   | 52 |
| 0,1                                 | 8                         | 23 | 9   | 32 | 9   | 32 | 11  | 38 | 14   | 38 | 16   | 52 |
| 0,15                                | 8                         | 32 | 10  | 32 | 10  | 32 | 14  | 38 |      |    |      |    |
| 0,22                                | 8                         | 32 | 12  | 32 | 11  | 38 | 16  | 38 |      |    |      |    |
| 0,33                                | 10                        | 32 | 14  | 38 | 14  | 38 |     |    |      |    |      |    |
| 0,47                                | 11                        | 32 | 16  | 38 | 16  | 38 |     |    |      |    |      |    |
| 0,68                                | 12                        | 38 | 16  | 52 |     |    |     |    |      |    |      |    |
| 1                                   | 14                        | 38 | 16  | 52 |     |    |     |    |      |    |      |    |

Технические условия на конденсаторы К42У-2 предусматривают возможность их эксплуатации в интервале температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ . Допустимые рабочие напряжения при различных температурах и сроках службы приведены в табл. 24.

Таблица 24

Допустимые рабочие напряжения для конденсаторов К42У-2 при различных температурах и сроках службы

| $U_{\text{ном}},$<br>$\text{в}$ | Срок службы, $\text{ч}$           |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|---------------------------------|-----------------------------------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
|                                 | 4000                              |      |     | 1000 |      |      | 500  |      |      | 50   |      |  |
|                                 | Температура, $^{\circ}\text{C}$   |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
|                                 | 70                                | 85   | 100 | 70   | 85   | 100  | 70   | 85   | 100  | 85   | 100  |  |
|                                 | Допустимое напряжение, $\text{в}$ |      |     |      |      |      |      |      |      |      |      |  |
| 160                             | 160                               | 100  | 50  | 170  | 130  | 80   | 200  | 160  | 100  | 200  | 160  |  |
| 250                             | 250                               | 200  | 100 | 300  | 230  | 160  | 350  | 250  | 200  | 300  | 250  |  |
| 400                             | 400                               | 250  | 150 | 450  | 350  | 250  | 500  | 400  | 300  | 500  | 400  |  |
| 630                             | 630                               | 500  | 300 | 700  | 550  | 400  | 750  | 650  | 500  | 700  | 630  |  |
| 1000                            | 1000                              | 800  | 500 | 1100 | 900  | 630  | 1200 | 1000 | 750  | 1200 | 1000 |  |
| 1600                            | 1600                              | 1300 | 800 | 1700 | 1500 | 1000 | 1800 | 1600 | 1200 | 1800 | 1600 |  |

В процессе эксплуатации в течение сроков, указанных в табл. 24, предприятие-изготовитель гарантирует изменение емкости не более чем на  $\pm 10\%$  сверх допуска, указанного в маркировке конденсаторов, тангенс угла потерь должен быть не более 0,025, а постоянная времени должна составлять не менее 30% от значения, нормированного при выпуске (200 Мом·мкф для конденсаторов с номинальным напряжением 160 в и 1000 Мом·мкф при более высоких напряжениях).

Допустимые значения напряжения переменного тока, а также переменной составляющей пульсирующего напряжения те же, что и для конденсаторов МБГ.

### § 36. Конденсаторы для цепей переменного тока (тип МБГЧ)

Условия работы конденсаторов в цепях переменного тока значительно отличаются от условий работы в цепях постоянного тока:

1. При подаче на выводы конденсаторов переменного напряжения по обкладке будут протекать значительные токи, величина которых в любом исследуемом участке обкладки будет определяться местом расположения этого участка, конструкцией конденсатора, толщиной диэлектрика и скоростью изменения приложенного напряжения со временем, т. е.  $\frac{dU}{d\tau}$ .

Поскольку по обкладкам конденсаторов могут проходить большие токи, возможно выделение значительного количества тепла в обкладках.

При работе на переменном напряжении существенное значение имеют также и диэлектрические потери.

Суммарные потери энергии в диэлектрике и обкладках конденсатора в единицу времени могут быть определены по формуле:

$$P_A = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (36)$$

2. При переходе от постоянного напряжения к переменному существенно изменяются условия работы слоистого диэлектрика вследствие изменения распределения электрического поля.

Если на постоянном токе при установившемся режиме напряженность поля распределяется между слоями диэлектрика обратно пропорционально их сквозным прово-

димостям, то на переменном токе напряженность поля распределяется обратно пропорционально полным проводимостям. В этом случае выражение для распределения напряженности поля принимает вид:

$$\frac{E_{1\text{усг}}}{E_{2\text{уст}}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_2}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_1}}. \quad (37)$$

Здесь индексы 1 и 2 отмечают диэлектрическую проницаемость и угол потерь соответственно для первого и второго слоя в слоистом диэлектрике.

Поскольку для обоих слоев диэлектрика металlobумажного конденсатора (лак, бумага) углы потерь невелики, то и  $\operatorname{tg}^2 \delta_1$  и  $\operatorname{tg}^2 \delta_2$  малы по сравнению с единицей, поэтому приближенно можно считать, что напряженность электрического поля в диэлектрике металlobумажного конденсатора распределяется между отдельными слоями обратно пропорционально их диэлектрическим проницаемостям:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \quad (38)$$

Следовательно, при выборе материалов, составляющих диэлектрик металlobумажного конденсатора, предназначенного для работы в цепях переменного тока, необходимо добиваться, чтобы слои, имеющие низкую диэлектрическую проницаемость, обладали высокой электрической прочностью, так как в этих слоях напряженность поля будет увеличена. Отсюда также очевидно, насколько важно полное удаление воздушных включений, обладающих малой диэлектрической проницаемостью и низкой электрической прочностью.

3. Исследования, проведенные В. Т. Ренне, Г. С. Кучинским и В. М. Файницким, показали, что старение бумажного конденсатора, работающего на переменном токе, обуславливается периодическими перенапряжениями, приводящими к снижению ионизационной напряженности. Конденсаторы пробиваются, когда ионизационная напряженность оказывается ниже рабочей.

С учетом вышеуказанных особенностей работы конденсаторов в цепях переменного тока разработаны специальные конденсаторы типа МБГЧ (металlobумажные герметизированные частотные). Конденсаторы МБГЧ выпускают

в металлических паяных или тянутых корпусах со стеклянными проходными изоляторами типа ИСШ, впаянными в крышку мягким припоем. Конденсаторы МБГЧ предназначены для работы при напряжениях от 250 до 1000 в (эффективные значения). Номинальное напряжение установлено для работы при температуре 70° С.

Шкала номинальных напряжений, емкостей и размеры корпусов по отдельным номиналам приведены в табл. 25.

Таблица 25

Габаритные размеры конденсаторов МБГЧ

| Номинальная емкость, мкф | Номинальное напряжение, в             |           |           |           |
|--------------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                          | 250                                   | 500       | 750       | 1000      |
|                          | Размеры конденсаторов, мм (L × B × H) |           |           |           |
| 0,25                     | —                                     | 31×31×25  | 21×46×50  | 31×46×50  |
| 0,5                      | 16×31×25                              | 16×46×50  | 31×46×50  | 51×46×50  |
| 1                        | 31×31×25                              | 31×46×50  | 56×46×50  | 39×69×115 |
| 2                        | 16×46×50                              | 51×46×50  | 39×69×115 |           |
| 4                        | 31×46×50                              | 34×69×115 |           |           |
| 10                       | 61×46×50                              |           |           |           |

Для удобства монтажа конденсаторы МБГЧ выпускаются с различными видами крепления, как показано на рис. 69; слева показан конденсатор без крепежных планок, предназначенный для крепления скобами в любом положении.

Диэлектрик конденсаторов МБГЧ состоит из двух слоев нелакированной конденсаторной бумаги толщиной 8 мк, пропитанной конденсаторным вазелином. Номинальное напряжение на одну секцию принято равным 250 в. Конденсаторы с номинальным напряжением выше 250 в собирают из последовательно соединенных секций.

Рассмотрим, в какой степени конструкция конденсаторов МБГЧ учитывает особенности работы конденсаторов в цепях переменного тока.

Тонкие обкладки металlobумажных конденсаторов на первый взгляд, препятствуют применению этих конденсаторов в цепях переменного тока, но конструкция металlobумажных конденсаторов предусматривает контактирование обкладок с одного края по всей их длине. Поэтому общее сопротивление обкладок получается относительно малым, в результате чего малая толщина обкладок на низ-

ких частотах практически не сказывается на величине тангенса угла потерь металлобумажных конденсаторов.

Расчеты, проведенные по формуле (17), показывают, что при ширине бумаги 37 мм и частоте 10 кГц при обкладках, имеющих проводимость  $0,2 \text{ ом}^{-1}$ , величина составляющей тангенса угла потерь, обусловленной сопротивлением обкладок, не превышает 0,0002.

Исследования металлобумажных конденсаторов с различной толщиной обкладок при частотах от 50 гц до 5 кГц

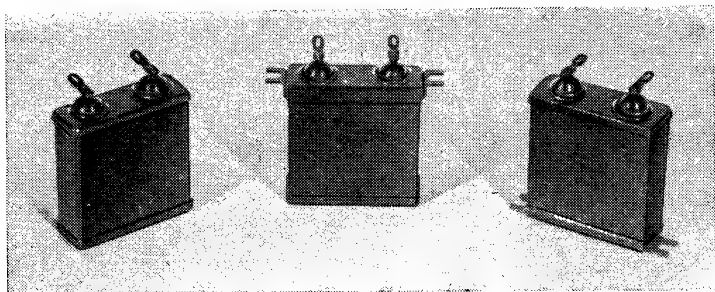


Рис. 69. Внешний вид конденсаторов МБГЧ.

(рис. 70) показали, что изменение электропроводности обкладок в пределах от 1,2 до  $0,2 \text{ ом}^{-1}$  еще не дает значительных изменений тангенса угла потерь.

С другой стороны, образцы металлобумажных конденсаторов с толстыми обкладками оказались менее устойчивы при высоких напряженностях поля (рис. 71); по-видимому, в этом случае в процессе работы происходят единичные пробой диэлектрика, что вызывает больший разогрев конденсаторов с толстыми обкладками.

Таким образом, тонкие обкладки металлобумажных конденсаторов при звуковых частотах не вызывают существенного увеличения тангенса угла потерь и позволяют создать конденсаторы переменного тока, работающие при высокой напряженности поля в диэлектрике.

Диэлектрик металлобумажных конденсаторов постоянного тока обычно состоит из нескольких слоев пропитанной конденсаторной бумаги, причем один слой бумаги покрыт лаком. Диэлектрическая проницаемость лакового слоя, в зависимости от его состава, может изменяться, но,

как правило, она остается ниже диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги.

Наложение на конденсаторы с лакированной бумагой переменного напряжения создает высокую напряженность поля в лаковом слое, имеющем низкую диэлектрическую проницаемость, и вызывает его разрушение. Неоднородное поле, образующееся в местах разрушения лакового слоя, приводит к разрушению и бумажный диэлектрик. Поэтому

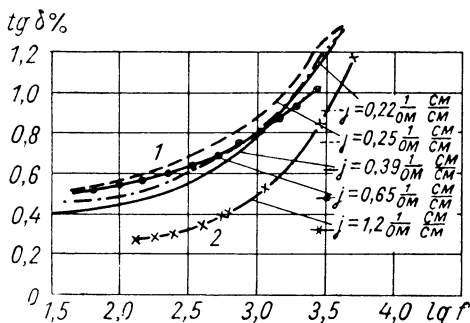


Рис. 70. Зависимость тангенса угла потерь металлобумажных конденсаторов от частоты при температуре 20° С

1 — электропроводность обкладок колеблется в пределах от 0,2 до 0,6 ом<sup>-1</sup>; 2 — электропроводность равна 1,2 ом<sup>-1</sup> (Вахтель).

металлобумажные конденсаторы, изготовленные из лакированной бумаги, при испытании под напряжением переменного тока пробиваются при более низком напряжении, чем из нелакированной. Это обстоятельство вынудило использовать нелакированную бумагу для изготовления конденсаторов МБГЧ, хотя электрическая прочность лакированной бумаги на постоянном токе значительно выше.

Указанные выше исследования В. Т. Ренне, Г. С. Кучинского и В. М. Файницкого показали существование двух значений ионизационных напряжений поля (рис. 72): начальной, которая характерна для вновь изготовленных конденсаторов, и конечной (минимальной), которая имеет место у состарившихся или непропитанных конденсаторов. Оба эти значения напряженности поля снижаются с увеличением толщины диэлектрика.

При малой толщине диэлектрика, которая принята в конденсаторах МБГЧ (16 мк), минимальная ионизационная напряженность поля лежит выше 20 кВ/мм. При напряжениях, принятых в конденсаторах МБГЧ на одну секцию, на основании вышеприведенных исследований, рабочая напряженность составляет 15,6 кВ/мм, т. е. ниже  $(E_{\text{ион}})_{\text{мин}}$ , поэтому нет оснований опасаться развития ионизационных процессов.

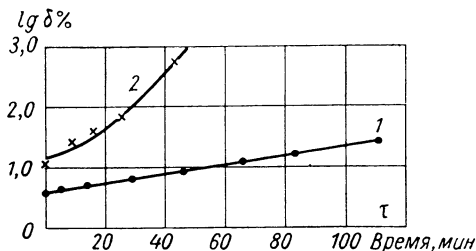


Рис. 71. Зависимость тангенса угла потерь металлобумажных конденсаторов с обкладками, имеющими различную электропроводность, от времени испытания при температуре 20° С, частоте 50 гц и напряженности поля 25 кВ/мм

1 — 0,4 ом<sup>-1</sup>; 2 — 1,5 ом<sup>-1</sup> (Вахтель).

Также с целью ослабления ионизационных процессов секции конденсаторов МБГЧ пропитываются вазелином вместо церезина, применяемого для пропитки секций металлобумажных конденсаторов постоянного тока.

Таким образом, конструкция конденсаторов МБГЧ значительно отличается от конструкции конденсаторов, разработанных для цепей постоянного тока; это обеспечивает устойчивую их работу при переменном токе.

Удельные объемы конденсаторов МБГЧ значительно ниже, чем у обычных косинусных конденсаторов типа КМ. Сравнение этих удельных объемов приведено в табл. 26.

Как видно из таблицы, наиболее значительное снижение объемов получено при низких напряжениях, когда в конденсаторах с фольговыми обкладками приходится вводить повышенное число слоев диэлектрика с целью повышения запаса электрической прочности. В металлобумажных конденсаторах малое число слоев не опасно, так как слабые места диэлектрика отключаются в процессе тренировки.

Снижение удельного объема при напряжении 1000 в получено за счет повышения напряженности поля в сравнении с конденсаторами КМ, что стало возможным в связи с повышением ионизационной напряженности поля при малой толщине диэлектрика в конденсаторе МБГЧ.

Конденсаторы МБГЧ выпускаются с отклонением действительной емкости от номинальной в  $\pm 5$ ;  $\pm 10$  и  $\pm 20\%$ .

Тангенс угла потерь конденсаторов МБГЧ нормируется не выше 0,01. Требования к величине тангенса угла потерь для

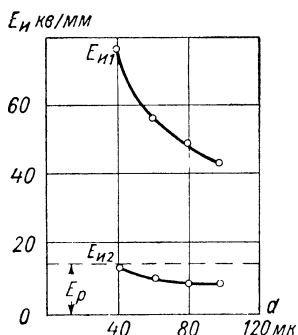


Рис. 72. Зависимость начальной  $E_{и1}$  и конечной (минимальной)  $E_{и2}$  ионизирующей напряженности поля от толщины диэлектрика в бумажно-масляных конденсаторах (Ренне, Кучинский, Файницкий).

Таблица 26

Сравнение удельных объемов конденсаторов КМ и МБГЧ

| Номинальное напряжение, в (50 гц) | Удельный объем конденсаторов КМ, $\text{дм}^3/\text{квар}$ | Удельный объем конденсаторов МБГЧ, $\text{дм}^3/\text{квар}$ | $\frac{v_1}{v_2}$ |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------|
| 250                               | 3,65                                                       | 0,82                                                         | 4,32              |
| 500                               | 2,44                                                       | 0,854                                                        | 2,86              |
| 750                               | 1,82                                                       | 0,830                                                        | 2,2               |
| 1000                              | 1,46                                                       | 0,890                                                        | 1,64              |

этих конденсаторов, следовательно, несколько жестче, чем в случае обычных металlobумажных конденсаторов. В производстве конденсаторов МБГЧ это ужесточение нормы не вызывает значительных трудностей.

Постоянная времени конденсаторов МБГЧ должна быть не ниже 1000 Мом·мкф. Высокое значение этой характеристики не является необходимым условием надежной работы конденсаторов МБГЧ, но сохраняется в нормах для контроля правильности технологии производства этих конденсаторов.

Изменение емкости и тангенса угла потерь конденсаторов МБГЧ с изменением температуры показано на рис. 73. Изменение емкости в интервале температур от  $-60$  до  $+80^\circ\text{C}$  обычно не превышает  $\pm 5\%$  от значения, измерен-

ного при  $20^{\circ}\text{C}$ , и только для отдельных образцов достигается величина порядка 8—10%.

Тангенс угла потерь (частота 50 гц) при снижении температуры от  $20^{\circ}\text{C}$  постепенно возрастает и при  $-60^{\circ}\text{C}$  достигает значения 0,02. При повышении температуры от  $20^{\circ}\text{C}$  тангенс угла потерь несколько возрастает, но и при  $+80^{\circ}\text{C}$  обычно не превышает 0,01.

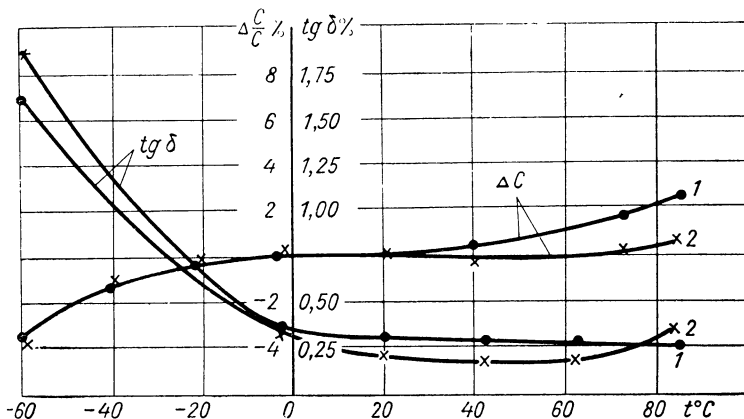


Рис. 73. Зависимость емкости и тангенса угла потерь конденсаторов МБГЧ от температуры

1 —  $U_{\text{ном.эфф}} = 1000$  в; 2 — 250 в (Вахтель).

С повышением частоты тангенс угла потерь конденсаторов МБГЧ заметно увеличивается (рис. 74) и при частоте 10 кгц, при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ , достигает величины порядка 0,012—0,018.

Область минимальных значений тангенса угла потерь при частоте 50 гц находится в интервале температур от  $+10$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  и с повышением частоты перемещается в область более высоких температур.

Установленные для конденсаторов МБГЧ номинальные напряжения были получены путем испытания при температуре  $70^{\circ}\text{C}$ . Были также определены максимальные допустимые нагрузки и при других температурах при кратковременной эксплуатации (6 часов). При испытании наблюдались измерения двух характерных параметров: температуры корпуса и тангенса угла потерь. За максимальную, но допустимую напряженность поля при кратковременной

эксплуатации, принималась та, при которой за 6 часов достигались установившиеся значения вышеуказанных параметров. Если напряженность поля не превышает определенных значений, то за время 6 часов у конденсаторов МБГЧ с максимальными размерами корпуса устанавливается тепловое равновесие, т. е. температура на поверхности корпуса достигает установившегося значения.

Однако при этих условиях может наблюдаться рост угла потерь во времени, свидетельствующий о начале иони-

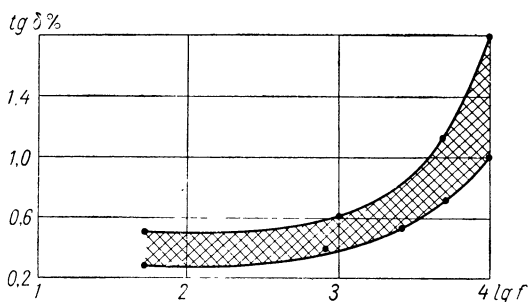


Рис. 74. Зависимость тангенса угла потерь конденсаторов МБГЧ от частоты при температуре 20°С (Вахтель).

зационных процессов и диэлектрике конденсатора, и для того чтобы обеспечить стабильность угла потерь, придется снижать напряженность поля в сравнении с тем наибольшим значением, при котором еще сохраняется тепловое равновесие. Поэтому зависимость допускаемой максимальной напряженности поля от температуры может быть охарактеризована двумя кривыми 1 и 2; как показывает рис. 75, кривая 1 дает границу  $E_{\text{макс}}$  по тепловому равновесию, а кривая 2 — по стабильности угла потерь, т. е. по отсутствию ионизации. Эти кривые соответствуют размерам корпуса 46 × 26 × 50 мм и частоте 50 гц.

Полученные данные показывают, что при температурах ниже 100°С ограничивающим фактором является ионизация, а при более высоких температурах — тепловая неустойчивость. Кривая 3 характеризует рекомендуемый рабочий режим для длительной эксплуатации. С повышением частоты тепловыделение в конденсаторах возрастает. Опыты, проведенные на конденсаторах МБГЧ для определения допустимой напряженности поля при кратковре-

менной работе, обеспечивающей тепловую стабильность при частоте 500 гц и температуре 70° С, показали, что в этих условиях допускаемое значение напряженности примерно в два раза ниже, чем при частоте 50 гц.

Следовательно, с увеличением частоты в десять раз напряженность поля может быть снижена всего в два раза. Тепловыделение в таком режиме при частоте 500 гц будет примерно в три раза больше, чем при частоте 50 гц, но,

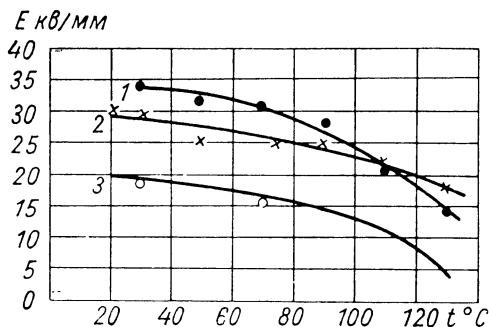


Рис. 75. Зависимость допустимой напряженности поля для конденсаторов МБГЧ от температуры при частоте 50 гц в различных условиях

1 — по тепловому равновесию при работе 6 ч; 2 — по стабильности угла потерь при работе 6 ч; 3 — рекомендуемый рабочий режим при длительной эксплуатации (Вахтель).

как показали испытания, конденсаторы МБГЧ в этих режимах работают устойчиво и условий для развития теплового пробоя не возникает.

Конденсаторы МБГЧ безусловно могут работать и при более высоких частотах, но при этом количество тепла, выделяемое за счет потерь в конденсаторе, не должно превышать того, которое выделяется при частоте 500 гц и определено как предельно допустимое для этих конденсаторов. Из этих соображений можно рассчитать и предельно допустимое напряжение при других частотах, полагая

$$U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = \text{const.}$$

Значения тангенса угла потерь при различных частотах могут быть взяты по кривой рис. 74, а емкость можно считать постоянной, поскольку изменение ее с частотой незначительно.

Расчетные значения допустимого напряжения, полученные на основе вышеприведенных данных и выраженные в процентах от номинального значения, приведены на рис. 76.

При работе конденсаторов МБГЧ в импульсном режиме, так же как и в случае металлобумажных конденсаторов постоянного тока, может происходить разрушение об-

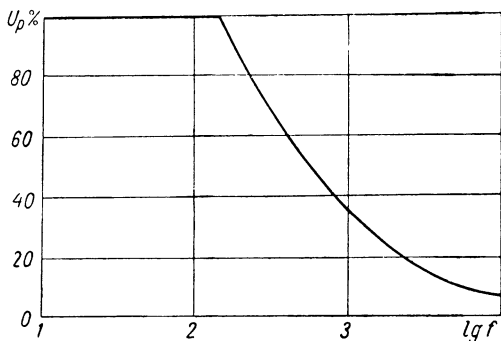


Рис. 76. Расчетная зависимость допустимого значения напряжения переменного тока от частоты для конденсаторов МБГЧ.

кладки вследствие протекания больших токов. Поэтому необходимо оговаривать величину максимально допустимого тока.

Испытания конденсаторов МБГЧ, проведенные при температуре  $70^\circ \text{C}$ , показывают возможность двукратного увеличения амплитудного значения тока при эксплуатации их в импульсном режиме в сравнении с амплитудой синусоидального тока той же частоты.

### § 37. Металлобумажные радиоконденсаторы за рубежом

Металлобумажные конденсаторы изготавливаются во всех крупных капиталистических странах: в США, Англии, Франции, ФРГ, Японии, Италии и т. д. и в ряде социалистических стран: в Чехословакии, Польше и др.

Из рекламных данных английских и американских фирм следует, что в этих странах металлобумажные конденсаторы выпускают многих различных типов и модификаций с особенно большим разнообразием для конденса-

торов малой емкости. Английская фирма «Хэнт» изготовляет металлобумажные конденсаторы при номинальном напряжении 400 в, начиная с емкости от 500 пф, а при напряжении 600 в — начиная от 50 пф.

Большое разнообразие наблюдается также в конструктивном оформлении конденсаторов и в системах крепления.

На рис. 77 показаны основные типы цилиндрических металлобумажных конденсаторов фирмы «Спрэйг» (США),

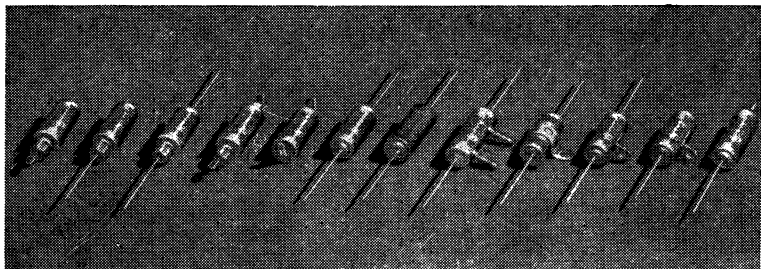


Рис. 77. Цилиндрические металлобумажные конденсаторы фирмы «Спрэйг» (США).

а в табл. 27 приведена шкала емкостей и габаритные размеры этих конденсаторов при номинальных напряжениях 200 и 400 в.

Большинство зарубежных фирм выпускают металлобумажные конденсаторы с допускаемым отклонением емкости от номинального значения, равным  $\pm 20$ — $25\%$ , и лишь в порядке исключения с отклонением  $\pm 10\%$ .

Значение  $\operatorname{tg} \delta$  указывается, обычно, не более 0,01 при частоте 50—60 гц и не более 0,02 при частоте 1 кГц. Норма на постоянную времени при 20—25° С составляет 200 Мом·мкф. При малых емкостях нормируется не постоянная времени, а сопротивление изоляции.

Интервал рабочих температур составляет от —50 до +70° С и выше. Фирма «Спрэйг» для миниатюрных металлобумажных конденсаторов типа 118Р указывает верхний предел рабочей температуры без снижения рабочего напряжения, равный 125° С. При снижении рабочего напряжения в сравнении с номинальным некоторые фирмы дают верхний предел рабочей температуры для металлобумажных конденсаторов небольшого размера до 150° С.

**Шкала номинальных емкостей и габаритные размеры  
конденсаторов, выпускаемых фирмой «Спрэйг»**

| Номинальное<br>значение емко-<br>сти, <i>мкф</i> | Напряжение, <i>в</i>  |                     |                       |                     | Номинальное<br>значение емко-<br>сти, <i>мкф</i> | Напряжение, <i>в</i>  |                     |                       |                     |
|--------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
|                                                  | 200                   |                     | 400                   |                     |                                                  | 200                   |                     | 400                   |                     |
|                                                  | диаметр,<br><i>мм</i> | длина,<br><i>мм</i> | диаметр,<br><i>мм</i> | длина,<br><i>мм</i> |                                                  | диаметр,<br><i>мм</i> | длина,<br><i>мм</i> | диаметр,<br><i>мм</i> | длина,<br><i>мм</i> |
| 0,01                                             | 6                     | 15,8                | 7,9                   | 20,6                | 0,27                                             | 10,2                  | 27,0                | 14,2                  | 39,6                |
| 0,012                                            | 6                     | 15,8                | 7,9                   | 20,6                | 0,33                                             | 10,2                  | 27,0                | 14,2                  | 39,6                |
| 0,015                                            | 6                     | 15,8                | 7,9                   | 20,6                | 0,39                                             | 12,7                  | 27,0                | 17,0                  | 39,6                |
| 0,018                                            | 6                     | 15,8                | 7,9                   | 20,6                | 0,47                                             | 12,7                  | 27,0                | 17,0                  | 39,6                |
| 0,022                                            | 6                     | 15,8                | 7,9                   | 20,6                | 0,56                                             | 12,7                  | 27,0                | 17,0                  | 47,0                |
| 0,027                                            | 6                     | 15,8                | 7,9                   | 27,0                | 0,68                                             | 12,7                  | 27,0                | 17,0                  | 47,0                |
| 0,033                                            | 6                     | 15,8                | 7,9                   | 27,0                | 0,82                                             | 14,2                  | 27,0                | 19,0                  | 47,0                |
| 0,039                                            | 7,9                   | 20,6                | 10,2                  | 27,0                | 1,0                                              | 14,2                  | 27,0                | 19,0                  | 47,0                |
| 0,047                                            | 7,9                   | 20,6                | 10,2                  | 27,0                | 1,5                                              | 14,2                  | 39,6                | 25,4                  | 47,0                |
| 0,056                                            | 7,9                   | 20,6                | 10,2                  | 27,0                | 2,0                                              | 17,0                  | 39,6                | 25,4                  | 47,0                |
| 0,068                                            | 7,9                   | 20,6                | 10,2                  | 27,0                | 3,0                                              | 17,0                  | 47,0                | 25,4                  | 65,0                |
| 0,082                                            | 7,9                   | 20,6                | 12,7                  | 27,0                | 4,0                                              | 19,0                  | 47,0                | —                     | —                   |
| 0,1                                              | 7,9                   | 20,6                | 12,7                  | 27,0                | 5,0                                              | 25,0                  | 47,0                | —                     | —                   |
| 0,12                                             | 7,9                   | 27,0                | 12,7                  | 27,0                | 6,0                                              | 25,4                  | 47,0                | —                     | —                   |
| 0,15                                             | 7,9                   | 27,0                | 12,7                  | 27,0                | 8,0                                              | 25,4                  | 47,0                | —                     | —                   |
| 0,18                                             | 10,2                  | 20,6                | 14,2                  | 33,4                | 10                                               | 25,4                  | 58,7                | —                     | —                   |
| 0,22                                             | 10,2                  | 20,6                | 14,2                  | 33,4                | 12                                               | 25,4                  | 65,0                | —                     | —                   |

На рис. 78 показана зависимость электрических свойств от температуры для металлобумажных конденсаторов типа W 97 английской фирмы «Хэнт».

Изменение емкости и тангенса угла потерь металлобумажных конденсаторов от температуры в значительной степени определяется природой материала, использованного для пропитки секции. Поэтому в зависимости от типа принятого пропитывающего состава различные фирмы дают различное отклонение емкости при крайних рабочих температурах от ее значения, измеренного при 20° С.

Так, фирма «Спрэйг» для конденсаторов типа 116Р указывает снижение емкости при —50° С около 4%, а для конденсаторов типа 118Р до 7%. При максимальной температуре, ограниченной для конденсаторов типа 116Р значением 85° С, указывается снижение емкости до 7%, а для конденсаторов 118Р с нормированной максимальной температурой 125° С указывается увеличение емкости до 7%.

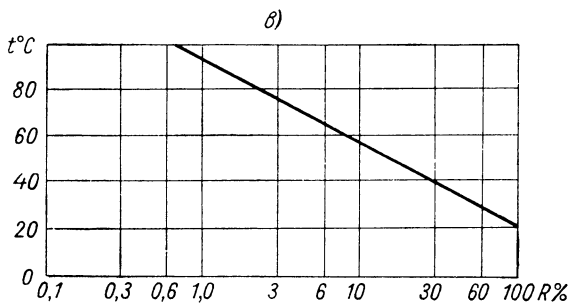
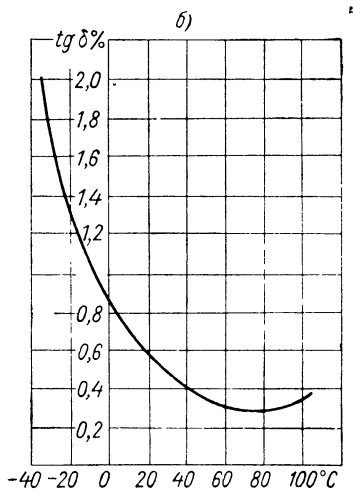
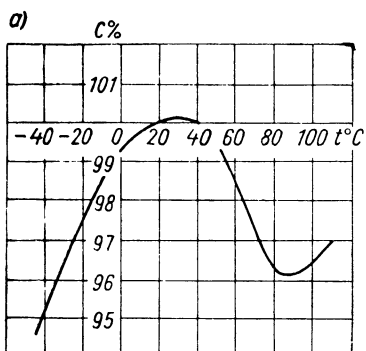


Рис. 78. Зависимость емкости (а), тангенса угла потерь (б) и сопротивления изоляции (в) конденсаторов типа «W97» фирмы «Хэнт» от температуры.

Постоянные времени при максимальной температуре обычно гарантируются не ниже 10—20 *Мом·мкф*. Фирма «Хэнт» для выражения зависимости сопротивления изоляции от температуры предлагает формулу:

$$R_t = \frac{R_0}{e^{k(t-20)}}, \quad (39)$$

где  $R_0$  — сопротивление изоляции при 20° С (принимается за 100%);

$R_t$  — сопротивление изоляции при температуре, в процентах от значения при 20° С;

$k$  — коэффициент, характеризующий скорость снижения сопротивления изоляции с повышением температуры; его значение колеблется в пределах от 0,065 до 0,07.

Большинство зарубежных фирм при номинальном напряжении 250 в и ниже выпускает металlobумажные конденсаторы с однослойным диэлектриком. Независимо от материала обкладок и использованного пропитывающего состава, отдельные образцы однослойных конденсаторов в процессе эксплуатации и хранения резко снижают сопротивление изоляции. Для устранения этого дефекта фирмой «САФ» (ФРГ) разработаны и рекламируются конденсаторы серии «К» с двухслойным диэлектриком, пропитанные полярным пропитывающим составом с высокой диэлектрической проницаемостью (ланостеролом) (§ 11).

Эти конденсаторы по удельным объемам незначительно превышают однослойные конденсаторы и имеют более устойчивое сопротивление изоляции в процессе эксплуатации и хранения. В то же время такие конденсаторы с полярной пропиткой должны значительно снижать емкость при отрицательных температурах; данных по этому вопросу фирма в своих каталогах не приводит.

Металlobумажные конденсаторы для работы в цепях переменного тока рекламируются небольшим количеством фирм и в весьма малом ассортименте. Так, фирма «Хэнт» в своих каталогах приводит металlobумажные конденсаторы переменного тока только с номинальным напряжением 250 в и емкостью до 8 *мкф*. Вопрос о выпуске силовых конденсаторов рассмотрен ниже.

Среди прочих модификаций металlobумажных конденсаторов, выпускаемых за рубежом, следует отметить одноленточную конструкцию фирмы «Хэнт». Эта фирма для

намотки секций металlobумажных конденсаторов малых размеров вместо нескольких лент применяет только одну бумажную ленту, на которой нанесены обе обкладки, а также имеются неметаллизированные участки для получения начальных и конечных холостых витков. При изготовлении секций с повышенным рабочим напряжением, в которых диэлектрик должен состоять из нескольких слоев бумаги, на одной и той же бумажной ленте создают

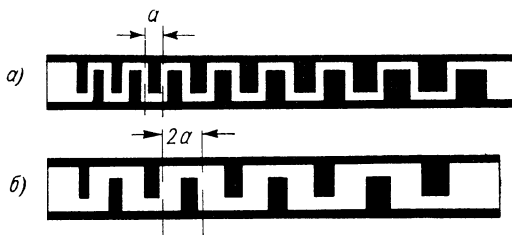


Рис. 79. Металлизованная бумага, подготовленная для намотки одноленточных конденсаторов: *а* — однослойный диэлектрик; *б* — двухслойный диэлектрик.

участки бумаги необходимой длины, не покрытые металлом, для получения дополнительных слоев диэлектрика между обкладками.

Такую бумажную ленту получают из обыкновенной металлизированной бумаги со сплошным покрытием путем снятия металла в нужных местах. Фотография образца бумаги, подготовленной для намотки секций с одним слоем диэлектрика, приведена на рис. 79, *а* и с двумя слоями диэлектрика — на рис. 79, *б*.

Шаг *a* дает один полный оборот бумажной ленты на наматываемой секции. При намотке, по мере увеличения диаметра наматываемой секции, увеличивается длина каждого последующего витка, поэтому необходимо постепенное увеличение и шага *a*.

Такой метод изготовления конденсаторов значительно облегчает намотку секций, увеличивает поверхность контакта обкладок с выводами, что особенно важно для малых секций, но в то же время приводит к значительному увеличению объема секции. Поэтому он применяется только для изготовления секций малой емкости, когда увеличение

размера секции еще не дает существенного увеличения объема готовых конденсаторов.

С целью защиты конденсаторов от действия влаги английскими фирмами широко используются резиновые

уплотнения. На рис. 80 приведены некоторые типы таких резиновых уплотнений. Наиболее интересным следует считать вариант *в*, в котором использована резина, наклеенная на слоистый пластик, что предохраняет резину от вспучивания и более надежно защищает секцию от воздействия влаги.

Большое распространение имеют также конструкции конденсаторов, в которых в качестве уплотнения и изоляции выводов от корпуса применяется эпоксидная смола.

### § 38. Силовые металлобумажные конденсаторы

До последнего времени металлобумажный конденсатор рассматривался только как элемент радиотехники или электроники и преимущественно рассчитывался на

применение при постоянном напряжении и лишь изредка — для небольших напряжений переменного тока (конденсаторы МБГЧ).

В настоящее время за рубежом начинает расширяться применение металлобумажных конденсаторов в силовой электротехнике при технической частоте 50—60 гц.

В § 36 было указано, что условия работы конденсатора при переменном напряжении существенно отличаются от тех, которые имеют место при постоянном напряжении. Это необходимо учитывать при проектировании металлобумажного конденсатора переменного тока, что и было показано на примере конденсатора МБГЧ. Однако этот

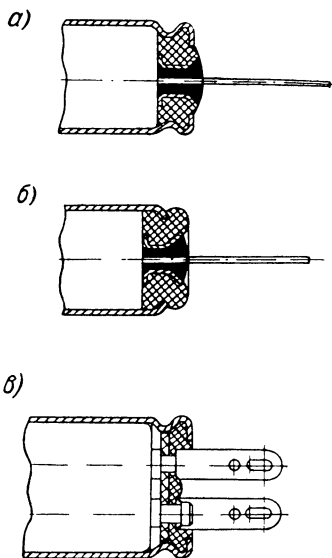


Рис. 80. Три варианта резиновых уплотнений, применяемых в конструкции металлобумажных конденсаторов зарубежными фирмами: *а* и *б* — проволочные выводы; *в* — лепестковые.

конденсатор рассчитан на относительно небольшое рабочее напряжение до 1 кВ при частоте 50 гц и имеет небольшую реактивную мощность. При напряжении 1 кВ максимальная емкость 1 мкф соответствует реактивной мощности  $P_R$ , равной:

$$P_R = U^2 \omega C = (10^3)^2 2\pi 50 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 314 \text{ вар.}$$

В силовой электротехнике требуются конденсаторы на большее напряжение и с большими значениями реактивной мощности, что осложняет проектирование и разработку силовых металлобумажных конденсаторов.

Первой трудностью, с которой приходится сталкиваться при такой разработке, является проблема отвода тепла, выделяемого в конденсаторных секциях. Выше уже отмечалось, что несмотря на малую толщину слоя металла, обуславливающую повышенное сопротивление обкладок металлобумажного конденсатора в сравнении с обычным бумажным конденсатором, имеющим обкладки из алюминиевой фольги, угол потерь металлобумажного конденсатора мало отличается от угла потерь обычного бумажного конденсатора в области низких частот.

Таким образом, потери, выделяющиеся в секциях металлобумажного силового конденсатора, будут, примерно, такими же, как и у обычных силовых бумажных конденсаторов. Трудность заключается в том, что отвод тепла, обусловленного этими потерями, из внутренних частей секций в случае металлобумажного конденсатора будет сильно осложнен пониженной эквивалентной теплопроводностью секции. Действительно, в секции обычного бумажного конденсатора с фольговыми обкладками большую роль играет теплопроводность относительно толстой металлической фольги, в связи с чем приходится учитывать различие в теплопроводности в направлении по слоям бумаги и фольги и в направлении, перпендикулярном этим слоям.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности конденсаторной секции в направлении, параллельном слоям, будет равен (рис. 81):

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_{\delta} \frac{d_{\delta}}{d_{\delta} + d_{\phi}} + \lambda_{\phi} \frac{d_{\phi}}{d_{\delta} + d_{\phi}}, \quad (40)$$

где  $\lambda_{\delta}$  — коэффициент теплопроводности пропитанной бумаги, равный  $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см} \cdot \text{град}$ ;

$\lambda_{\phi}$  — коэффициент теплопроводности алюминиевой фольги, равный  $2 \text{ вт/см} \cdot \text{град}$ ;

$d_{\delta}$  — толщина бумаги между обкладками,  $\text{см}$ ;

$d_{\phi}$  — толщина фольги,  $\text{см}$ .

Эквивалентный коэффициент теплопроводности секции в направлении, перпендикулярном слоям бумаги и фольги, равен:

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_{\delta} \lambda_{\phi}}{\lambda_{\phi} \frac{d_{\delta}}{d_{\delta} + d_{\phi}} + \lambda_{\delta} \frac{d_{\phi}}{d_{\delta} + d_{\phi}}} \quad (41)$$

Обозначения те же, что и в предыдущей формуле.

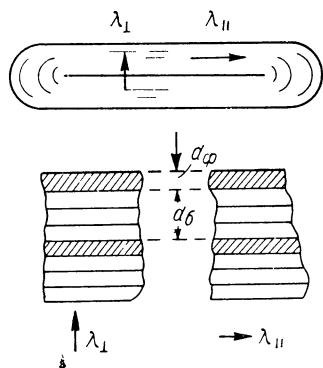


Рис. 81. К рассмотрению теплопроводности секции.

будет мала в связи с резким уменьшением толщины металлических обкладок. Приняв то же значение толщины диэлектрика  $30 \text{ мк}$  и толщину слоя металла  $0,1 \text{ мк}$  (для цинка  $\lambda_{\phi} = 1,1 \text{ вт/см} \cdot \text{град}$ ), используя те же формулы, находим  $\lambda_{\parallel} = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ вт/см} \cdot \text{град}$  и  $\lambda_{\perp} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см} \cdot \text{град}$ . Величина  $\lambda_{\perp}$  лишь не намного отличается от того, что мы имели для обычного бумажного конденсатора, а величина  $\lambda_{\parallel}$ , которая определяет основную теплопроводность секции, снижена в 10 раз.

Для конденсаторов типа МБГЧ, имеющих небольшие размеры корпусов и сравнительно небольшой путь теплового потока от средних, наиболее нагретых частей секций к стенкам корпуса, затруднения с отводом тепла удалось преодолеть относительно легко.

Для мощных силовых конденсаторов отвод тепла из секций является более серьезной проблемой. Как показывает рис. 82, фирма «Бош» (ФРГ) преодолевает эту трудность, собирая конденсатор из большого числа относительно небольших секций, соединяемых в последовательно-параллельные группы и разделенных каналами, по которым циркулирует масло, обеспечивающее отвод тепла от секций к стенкам корпуса. При этом, в отличие от конденсаторов постоянного напряжения, замена фольги на тонкий слой металла, нанесенный на бумагу, не дает существенного снижения удельного объема конденсатора, так как благодаря масляным каналам использование объема корпуса в таких конденсаторах ухудшено.

Второй существенной трудностью при проектировании силовых металлобумажных конденсаторов большой мощности и повышенного напряжения является проблема ионизации в диэлектрике. В случае обычных силовых конденсаторов эта проблема решается сейчас по линии замены нефтяного масла, обладающего пониженной устойчивостью к воздействию переменного электрического поля, хлорированными пропиточными массами, типа хлордифенилов (например, соволом).

Однако для металлобумажного конденсатора применение хлорированных масс недопустимо, так как следы хлора в пропиточной массе вызывают коррозию тонкого металлического слоя, служащего обкладкой.

Для пропитки конденсаторов МБГЧ использован вазелин, который, как и масло, может разлагаться при воздействии поля, вызывающего ионизацию, но напряжение на каждую последовательно включенную секцию, равное 250 в, выбрано с таким расчетом, что рабочая напряженность поля лежит ниже минимального значения напряжен-

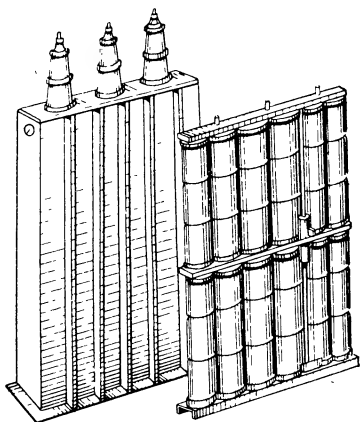


Рис. 82. Металлобумажный силовой конденсатор фирмы «Бош» (ФРГ) с реактивной мощностью 50 квар.

ности начала ионизации; при этом возможность развития ионизации в диэлектрике конденсаторов МБГЧ полностью исключена. Это было допустимо в связи с относительно небольшими значениями номинального напряжения.

При наибольшем значении  $U_{\text{ном}}$  для серии МБГЧ, равном 1 кВ, число последовательно включенных секций равно только четырем. Для силовых конденсаторов с напряжением порядка нескольких киловольт при напряжении на секции, равном 250 В, число последовательных секций делается чрезмерно большим, что конструктивно неудобно. При повышении секционного напряжения до значения порядка 400—500 В, как это сделано фирмой «Бош», напряженность электрического поля в секции оказывается ниже начального значения ионизирующей напряженности, но выше минимального значения. В этом случае конденсатор может вполне надежно работать при номинальном напряжении, но повышение напряжения сверх номинального, даже кратковременное, будет опасным, если при этом напряженность поля окажется выше начальной.

Если в случае обычного бумажного конденсатора перенапряжение, значительно превышающее номинальное напряжение, опасно потому, что может вызвать окончательный пробой диэлектрика и закорачивание обкладок, т. е. гибель конденсатора, то в случае металлобумажного конденсатора пробой будет сопровождаться самовосстановлением, а потому сам по себе не опасен. Однако в процессе самовосстановления происходит выделение газов, которое может привести к снижению ионизирующей напряженности до уровня рабочей напряженности конденсатора или даже еще ниже, что приведет к усиленному развитию ионизационных процессов в конденсаторе и к его гибели. Если два-три пробоя мало опасны, то несколько десятков пробоев уже существенно сказываются на уровне напряжения начала ионизации силового металлобумажного конденсатора, как показано на рис. 83.

Фирме «Бош» удалось значительно повысить устойчивость своих силовых металлобумажных конденсаторов в отношении развития ионизации, как показывает рис. 84. Для секций «правильной конструкции» при систематическом воздействии перенапряжений, вызывающих появление ионизации при номинальном рабочем напряжении, возникающая в момент перенапряжения ионизация затем сравнительно быстро затухает и прекращается. Вероятно

это достигнуто прежде всего подбором сорта масла, имеющего повышенную устойчивость по сравнению с обычным нефтяным конденсаторным маслом (этого можно достигнуть, подбирая оптимальное содержание ароматических

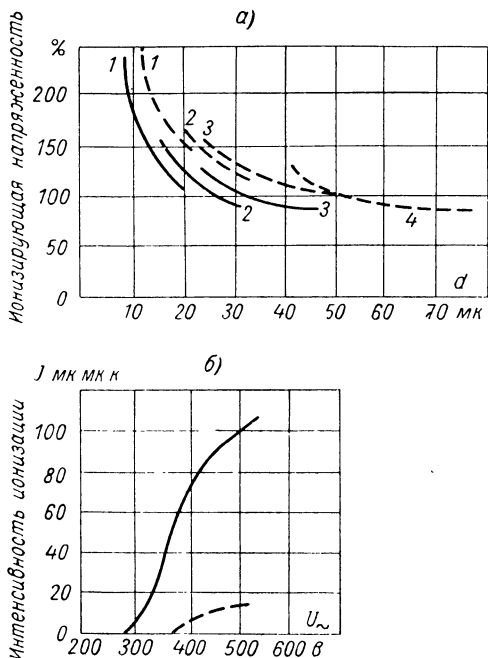


Рис. 83. Влияние неоднократных перенапряжений на зависимость ионизационной напряженности от толщины диэлектрика (а) и на зависимость интенсивности ионизации от напряжения (б) для силовых металлобумажных конденсаторов

пунктир — конденсатор выдержал 2—3 перенапряжения; сплошные кривые — 50 перенапряжений; цифры у кривых указывают число слоев бумаги между обкладками (Штрёб, Майландт).

соединений в масле или специальными добавками); возможно, что какую-либо роль могла сыграть и конструкция секций, а также выбор толщины слоя металлизации, ограничивающие выделение газа в момент пробоя и самовосстановления.

Тем не менее у немецких конструкторов, по-видимому, нет полной уверенности в том, что в условиях эксплуатации в силовых металлобумажных конденсаторах

возможность ионизации и связанного с ней усиленного газовыделения в конденсаторе полностью исключены. Об этом можно судить по публикуемым в немецкой литературе сведениям о защитных устройствах, предупреждающих возможность взрыва силовых металлобумажных конденсаторов путем отключения конденсатора, в котором давление накопившихся газов достигло опасного значения, а также о выдаче патентов на такие защитные устройства.\*

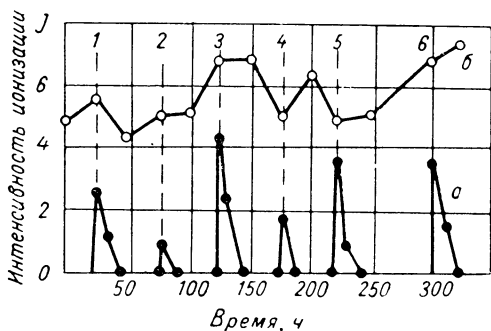


Рис. 84. Зависимость интенсивности ионизации, выраженной в условных единицах, от времени работы металлобумажных силовых конденсаторов, подвергаемых воздействию перенапряжений (в точках 1, 2, 3, 4, 5, 6): а — правильная конструкция секций; б — неправильная (Штрёб, Майландт).

Конструкция защитного устройства фирмы «Бош» для мощных силовых металлобумажных конденсаторов показана на рис. 85, а. При образовании опасного количества газа в конденсаторе происходит деформация гибкой стенки корпуса 1, при этом перемещается рычажок 2, связанный со стенкой, и обрывает надрезанную медную ленточку 3, по которой проходит ток конденсатора. Ленточка помещена в изоляционной трубке 4. В нижней части трубки расположена спиральная пружина 5, которая при разрыве ленточки сразу оттягивает вниз ее нижний конец и этим обрывает дугу. В трехфазном конденсаторе приходится размещать три таких устройства, по одному на фазу.

Хеннигер описывает устройство для аналогичной защиты силовых металлобумажных конденсаторов цилинд-

\* Например, французский патент фирмы «Бош», гр. 12, класс 6, № 1151835, 6. 02. 1958,

рического типа низкого напряжения; в этом случае газоразделение может быть связано уже не с ионизационными явлениями, а с локальным перегревом бумаги и пропиточной массы, в связи с плохой теплопроводностью секций; термическое разложение диэлектрика также сопровождается газоразделением (рис. 85, б). В данном случае при образовании газов внутри конденсатора деформируется

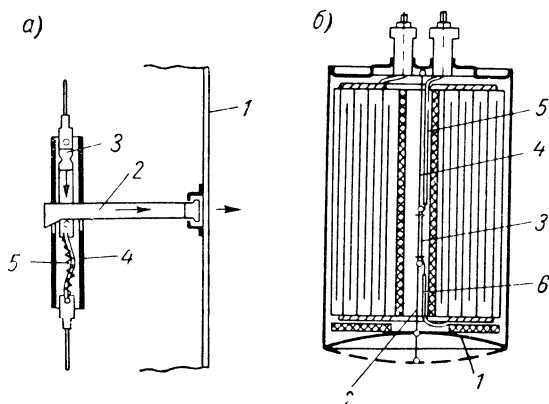


Рис. 85. Защитные устройства для предупреждения взрыва силовых металлобумажных конденсаторов: а — для конденсатора большой мощности в прямоугольном корпусе; б — для конденсатора небольшой мощности в цилиндрическом корпусе. (Пояснения в тексте.)

его гибкое дно 1, причем связанная с ним тяга 2 обрывает медную ленточку 3, несущую ток конденсатора. Верхняя часть ленточки связана с крышкой конденсатора тягой 4. Один конец ленточки электрически соединен с правым выводным изолированным проводником 5, а второй — с нижним контактом конденсаторной секции проводником 6.

Для устранения опасности локального нагрева в конденсаторных металлобумажных секциях Майландт, Швейцер и Трауб\* предложили изготавливать одну из обкладок металлобумажного конденсатора не из цинка или алюминия, а из легкоплавкого сплава на основе кадмия, висмута и цинка. Когда начинается сильный локальный

\* Патент ФРГ, № 965974, 4. 07. 1957, а также № 1086345, 2. 02. 1961.

разогрев, то такой сплав оплавляється и обкладка в месте нагрева распадается на ряд изолированных островков, отсоединяя нагретое место диэлектрика от обкладок еще до того, как температура бумаги достигнет значения, вызывающего сильное термическое разложение. Рекомендуются сплав из 60% Cd, 20% Bi и 20% Zn, который дает разрушение обкладки при 143° C. Толщина такой обкладки должна быть порядка 0,05 мк.

Наибольших успехов в производстве силовых металлобумажных конденсаторов достигла фирма «Бош», которая за последние годы выпустила таких конденсаторов с суммарной реактивной мощностью более 1 млн. *квар* как низкого, так и среднего напряжения (до 5 *кв*) с мощностью в единице до 25—50 *квар*. При напряжении ниже 220 *в* применяется один слой металлизированной бумаги, при напряжениях 220 — ниже 380 *в* — два слоя бумаги (одна металлизированная, одна простая) и при напряжениях 380—500 *в* — три слоя бумаги. Конденсаторы с напряжением выше 500 *в* изготавливаются с последовательным соединением секций, причем, как указывалось выше, напряжение на одну секцию берется в пределах 400—500 *в*.

Другие зарубежные фирмы, в частности, швейцарские, выпускают силовые конденсаторы с меньшим рабочим напряжением и меньшей реактивной мощностью, рассчитанные, в основном, не для улучшения коэффициента мощности, как большие конденсаторы фирмы «Бош», а для ряда других целей: пуск однофазных электродвигателей, схемы для люминесцентного освещения и т. п. Конденсаторы этих типов выпускает и фирма «Бош».

Преимуществом металлобумажных силовых конденсаторов в сравнении с обычными бумажными силовыми конденсаторами является их резко улучшенная устойчивость к перенапряжениям, исключая возможность случайного пробоя и короткого замыкания обкладок, а также экономия металла для изготовления обкладок и конденсаторной бумаги. Поэтому можно ожидать дальнейшего развертывания производства этих конденсаторов и в других странах, кроме ФРГ и Швейцарии, где до последнего времени они преимущественно изготавливались.

---

## ГЛАВА ШЕСТАЯ

# СТАРЕНИЕ МЕТАЛЛОБУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

### § 39. Общая характеристика процесса старения металлобумажных конденсаторов

Металлобумажные конденсаторы в процессе эксплуатации и при хранении ухудшают свои параметры, что является признаком старения конденсаторов. При изменении окружающей температуры и приложенного напряжения процессы старения ускоряются или замедляются и проявляются различно в зависимости от того, какой из параметров данного типа конденсаторов оказывается менее устойчивым.

На рис. 86 показаны схематически изменения емкости и постоянной времени металлобумажных конденсаторов от времени испытаний при повышенной температуре.

Емкость в начале испытания снижается на 1—2%, по-видимому, вследствие распрессовки секций при повышенной температуре. В дальнейшем емкость долгое время обычно не изменяется, но при достаточно длительной эксплуатации происходит значительное снижение емкости, которое вызывается разрушением обкладок.

Постоянная времени изменяется со временем эксплуатации при повышенной температуре различно, в зависимости от конструкции конденсаторов.

В многослойных конденсаторах сопротивление изоляции (постоянная времени) в начальный период испытаний обычно незначительно снижается, но в дальнейшем сохраняется на относительно высоком уровне, а иногда даже вновь повышается до первоначальных значений. У однослойных конденсаторов сопротивление изоляции в условиях эксплуатации при повышенных температурах является наименее стабильной характеристикой; эти

конденсаторы обычно выходят из строя в результате резкого снижения постоянной времени за такое время эксплуатации, при котором снижение емкости, вследствие разрушения обкладок, еще мало заметно.

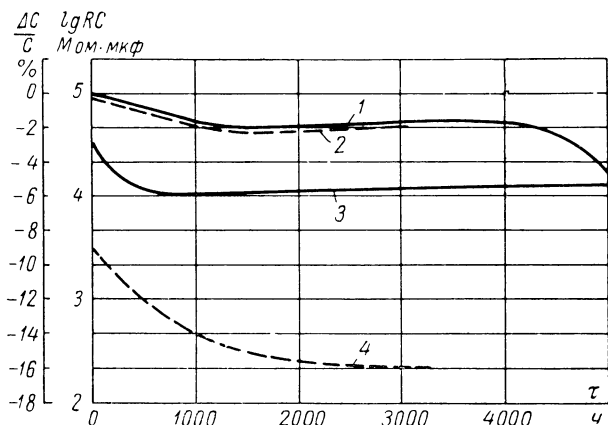


Рис. 86. Общий характер зависимости емкости (1, 2) и постоянной времени (3, 4) металлобумажных конденсаторов от времени эксплуатации

пунктир — однослойные конденсаторы; сплошные кривые — многослойные конденсаторы.

Поэтому процессы старения целесообразно рассматривать отдельно для однослойных и многослойных металлобумажных конденсаторов.

#### § 40. Старение однослойных конденсаторов

Исследование старения однослойных конденсаторов проводилось в различных условиях с периодической проверкой сопротивления изоляции, емкости и тангенса угла потерь.

В табл. 28 приведено количество однослойных конденсаторов, испытанных при различных режимах, а также количество конденсаторов, вышедших из строя по сопротивлению изоляции; по этим данным рассчитана интенсивность отказов, которая также указана в этой таблице. Как видно из таблицы, большее число отказов наблюдается при более высоких температурах.

Условия испытания, количество выходов и интенсивность отказов однослойных металлобумажных конденсаторов (за отказ принято резкое снижение сопротивления изоляции)

| Номиналь-<br>ная харак-<br>теристика |           | Количество<br>конденсато-<br>ров N, шт. | Условия<br>испытаний    |          | Срок испы-<br>тания, ч | Количество<br>отказов, n | Количество<br>отработав-<br>ших конден-<br>саторов, N <sub>1</sub> | Интенсив-<br>ность отка-<br>зов λ,<br>ч <sup>-1</sup> | Интенсив-<br>ность<br>отказов на<br>единицу<br>емкости λ <sub>C</sub> ,<br>мкф <sup>-1</sup> ч <sup>-1</sup> | Средняя<br>интенсив-<br>ность отка-<br>зов испыты-<br>ваемых партий<br>λ <sub>C ср</sub> ,<br>мкф <sup>-1</sup> ч <sup>-1</sup> | Расчетная<br>интенсив-<br>ность отка-<br>зов λ <sub>C рас</sub> ,<br>мкф <sup>-1</sup> ч <sup>-1</sup> |
|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-------------------------|----------|------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| U,<br>в                              | C,<br>мкф |                                         | U <sub>исп</sub> ,<br>в | t,<br>°C |                        |                          |                                                                    |                                                       |                                                                                                              |                                                                                                                                 |                                                                                                        |
| 160                                  | 30        | 40                                      | 0                       | 60       | 14 490                 | 26                       | 299 300                                                            | 8,7·10 <sup>-5</sup>                                  | 0,29·10 <sup>-5</sup> *                                                                                      | —                                                                                                                               | —                                                                                                      |
| 160                                  | 1         | 25                                      | 160                     | 60       | 19 500                 | 3                        | 439 450                                                            | 0,68·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,68·10 <sup>-5</sup>                                                                                        | —                                                                                                                               | —                                                                                                      |
| 160                                  | 15        | 27                                      | 160                     | 60       | 19 500                 | 7                        | 442 370                                                            | 1,58·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,105·10 <sup>-5</sup>                                                                                       | —                                                                                                                               | —                                                                                                      |
| 160                                  | 30        | 41                                      | 160                     | 60       | 14 490                 | 23                       | 281 300                                                            | 8,2·10 <sup>-5</sup>                                  | 0,27·10 <sup>-5</sup>                                                                                        | 0,2·10 <sup>-5</sup> *                                                                                                          | —                                                                                                      |
| 160                                  | 30        | 12                                      | 160                     | 60       | 19 500                 | 6                        | 132 330                                                            | 4,54·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,15·10 <sup>-5</sup>                                                                                        | —                                                                                                                               | —                                                                                                      |
| 160                                  | 1         | 52                                      | 0                       | 70       | 14 490                 | 1                        | 739 000                                                            | 0,14·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,14·10 <sup>-5</sup>                                                                                        | 0,14·10 <sup>-5</sup>                                                                                                           | 0,66·10 <sup>-5</sup>                                                                                  |
| 160                                  | 1         | 25                                      | 160                     | 70       | 20 300                 | 5                        | 431 570                                                            | 1,11·10 <sup>-5</sup>                                 | 1,16·10 <sup>-5</sup>                                                                                        | —                                                                                                                               | —                                                                                                      |
| 160                                  | 15        | 27                                      | 160                     | 70       | 20 300                 | 21                       | 234 556                                                            | 8,97·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,427·10 <sup>-5</sup>                                                                                       | 0,55·10 <sup>-5</sup>                                                                                                           | 0,476·10 <sup>-5</sup>                                                                                 |
| 160                                  | 30        | 12                                      | 160                     | 70       | 19 800                 | 10                       | 84 870                                                             | 11,8·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,393·10 <sup>-5</sup>                                                                                       | —                                                                                                                               | —                                                                                                      |
| 200                                  | 25        | 35                                      | 0                       | 70       | 14 490                 | 10                       | 370 800                                                            | 2,7·10 <sup>-5</sup>                                  | 0,11·10 <sup>-5</sup>                                                                                        | 0,11·10 <sup>-5</sup>                                                                                                           | 0,5·10 <sup>-5</sup>                                                                                   |
| 200                                  | 25        | 37                                      | 200                     | 70       | 14 490                 | 13                       | 353 130                                                            | 3,69·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,147·10 <sup>-5</sup>                                                                                       | 0,147·10 <sup>-5</sup>                                                                                                          | 0,37·10 <sup>-5</sup>                                                                                  |
| 250                                  | 4         | 35                                      | 250                     | 60       | 19 500                 | 12                       | 534 900                                                            | 2,25·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,565·10 <sup>-5</sup>                                                                                       | 0,565·10 <sup>-5</sup>                                                                                                          | 0,17·10 <sup>-5</sup>                                                                                  |
| 250                                  | 4         | 35                                      | 250                     | 70       | 20 300                 | 14                       | 491 272                                                            | 2,85·10 <sup>-5</sup>                                 | 0,713·10 <sup>-5</sup>                                                                                       | 0,713·10 <sup>-5</sup>                                                                                                          | 0,4·10 <sup>-5</sup>                                                                                   |

|                                           |  |
|-------------------------------------------|--|
| Конденсаторы МБГ, изготовленные в 1952 г. |  |
|-------------------------------------------|--|

Конденсаторы МБГ, изготовленные в 1952 г.

\* Значения  $\lambda_{C \text{ ср}}$  приняты за исходные величины для заданных условий и типа конденсаторов при вычислении  $\lambda_{C \text{ рас}}$  для других условий.

| Номинальная характеристика |        | Количество конденсаторов N, шт. | Условия испытаний |       | Срок испытания, ч | Количество отказов, n | Количество обработанных конденсаторов-часов | Интенсивность отказов $\lambda$ , ч <sup>-1</sup> | Интенсивность отказов на единицу емкости $\lambda_C$ , мкф <sup>-1</sup> ч <sup>-1</sup> | Средняя интенсивность отказов испытуемых партий $\lambda_{C_{cp}}$ , мкф <sup>-1</sup> ч <sup>-1</sup> | Расчетная интенсивность отказов $\lambda_{C_{рас}}$ , мкф <sup>-1</sup> ч <sup>-1</sup> |
|----------------------------|--------|---------------------------------|-------------------|-------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| U, в                       | C, мкф |                                 | U исп, в          | t, °C |                   |                       |                                             |                                                   |                                                                                          |                                                                                                        |                                                                                         |

## Конденсаторы МБГ, изготовленные в 1959 г.

|     |    |    |   |     |       |    |         |                          |                          |                           |                        |
|-----|----|----|---|-----|-------|----|---------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|
| 200 | 2  | 89 | 0 | 70  | 6 000 | 5  | 511 300 | 0,98 · 10 <sup>-5</sup>  | 0,49 · 10 <sup>-5</sup>  | 0,348 · 10 <sup>-5</sup>  | 0,5 · 10 <sup>-5</sup> |
| 200 | 10 | 94 | 0 | 70  | 6 000 | 9  | 512 100 | 1,76 · 10 <sup>-5</sup>  | 0,176 · 10 <sup>-5</sup> |                           |                        |
| 200 | 2  | 40 | 0 | 70  | 3 000 | 3  | 114 600 | 2,62 · 10 <sup>-5</sup>  | 1,31 · 10 <sup>-5</sup>  |                           |                        |
| 200 | 10 | 31 | 0 | 70  | 2 000 | 7  | 54 000  | 13,0 · 10 <sup>-5</sup>  | 1,3 · 10 <sup>-5</sup>   | 1,86 · 10 <sup>-5</sup> * | —                      |
| 200 | 2  | 39 | 0 | 85  | 3 000 | 7  | 98 750  | 7,1 · 10 <sup>-5</sup>   | 3,55 · 10 <sup>-5</sup>  |                           |                        |
| 200 | 10 | 33 | 0 | 85  | 3 000 | 10 | 72 200  | 13,39 · 10 <sup>-5</sup> | 1,39 · 10 <sup>-5</sup>  |                           |                        |
| 200 | 2  | 40 | 0 | 100 | 2 000 | 8  | 65 950  | 12,1 · 10 <sup>-5</sup>  | 6,05 · 10 <sup>-5</sup>  | 4,63 · 10 <sup>-5</sup>   | 6,8 · 10 <sup>-5</sup> |
| 200 | 10 | 34 | 0 | 100 | 2 000 | 17 | 41 000  | 41,1 · 10 <sup>-5</sup>  | 4,14 · 10 <sup>-5</sup>  |                           |                        |

## Конденсаторы МБО, изготовленные в 1959 г.

|     |    |    |   |     |       |   |        |                         |                         |                         |                             |
|-----|----|----|---|-----|-------|---|--------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 300 | 30 | 10 | 0 | 100 | 4 400 | 2 | 39 400 | 5,1 · 10 <sup>-5</sup>  | 0,17 · 10 <sup>-5</sup> | 0,32 · 10 <sup>-5</sup> | 0,433 · 10 <sup>-5</sup> ** |
| 300 | 10 | 10 | 0 | 100 | 4 400 | — | 44 000 | —                       | —                       |                         |                             |
| 300 | 4  | 10 | 0 | 100 | 4 400 | 2 | 35 400 | 5,67 · 10 <sup>-5</sup> | 1,42 · 10 <sup>-5</sup> |                         |                             |
| 500 | 4  | 10 | 0 | 100 | 4 400 | 2 | 36 440 | 5,5 · 10 <sup>-5</sup>  | 1,38 · 10 <sup>-5</sup> |                         |                             |

\* Значения  $\lambda_{C_{cp}}$  приняты за исходные величины для заданных условий и типа конденсаторов при вычислении  $\lambda_{C_{рас}}$  для других условий.

\*\* На партиях конденсаторов МБО испытания проводились без наложения напряжения, а измерения сопротивления изоляции — при напряжении 100 в, поэтому при расчете значения  $\lambda_{C_{рас}}$  введен множитель (1—K).

Интенсивность отказов подсчитана по формуле:

$$\lambda = \frac{n}{N\tau} [q^{-1}], \quad (42)$$

где  $n$  — количество конденсаторов, снизивших сопротивление изоляции в процессе испытаний;  
 $N\tau$  — количество отработанных штук-часов; определено как сумма

$$N\tau = \sum_{n=1}^{n=N} (N_1\tau_1 + N_2\tau_2 + \dots + N_n\tau_n).$$

Исследование образцов, снизивших сопротивление изоляции, показывает, что низкое сопротивление локализовано в отдельных небольших участках диэлектрика. Удавалось выделить участки с высокой электропроводностью площадью меньше  $0,25 \text{ см}^2$ . При отключении таких участков конденсаторы восстанавливают сопротивление изоляции до нормального значения, характерного для данного типа конденсаторов.

Образцы однослойных конденсаторов, снизивших сопротивление изоляции в процессе испытаний при повышенной температуре без наложения напряжения, испытывались путем подачи на них медленно возрастающего напряжения. При этом часть образцов оттренировалась и повышала сопротивление изоляции.

Количество образцов, повысивших сопротивление изоляции при различных значениях напряжения, приведено в табл. 29.

Как видно из таблицы, путем приложения напряжения к выводам конденсатора у большинства образцов удается изолировать участки с повышенной электропроводностью. В этом случае обкладки в дефектных местах разрушаются на площади около  $1 \text{ мм}^2$ , и сопротивление изоляции конденсатора восстанавливается.

Общее количество конденсаторов, испытанных воздействием напряжения, было равно 41 штуке. В табл. 29 приведен коэффициент восстанавливаемости сопротивления изоляции  $K$  однослойных металлобумажных конденсаторов при различных напряжениях, полученный как отношение числа конденсаторов, восстановивших сопротивление изоляции при повышении напряжения до данного значения, к общему числу конденсаторов.

**Количество образцов однослойных металlobумажных конденсаторов, восстановивших сопротивление изоляции при различных напряжениях**

| $U_{\text{исп}}, \text{ в}$ | Количество образцов, восстановивших сопротивление изоляции, шт., $n$ | Коэффициент восстановления мости, $K = \frac{n}{N}$ | $U_{\text{исп}}, \text{ в}$ | Количество образцов, восстановивших сопротивление изоляции, шт., $n$ | Коэффициент восстановления мости, $K = \frac{n}{N}$ |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 5                           | 14                                                                   | 0,330                                               | 70                          | 1                                                                    | 0,878                                               |
| 10                          | 16                                                                   | 0,732                                               | 80                          | 2                                                                    | 0,926                                               |
| 20                          | 4                                                                    | 0,830                                               | 90                          | 1                                                                    | 0,950                                               |
| 30                          | —                                                                    | 0,830                                               | 100                         | —                                                                    | 0,950                                               |
| 40                          | —                                                                    | 0,830                                               | 120                         | —                                                                    | 0,950                                               |
| 50                          | —                                                                    | 0,830                                               | 140                         | —                                                                    | 0,950                                               |
| 60                          | 1                                                                    | 0,853                                               |                             |                                                                      |                                                     |

Поскольку низкое значение сопротивления изоляции обуславливается отдельными точками, то, по-видимому, и образование таких точек более вероятно на конденсаторах, имеющих большую площадь диэлектрика, т. е. большую емкость при одной и той же толщине диэлектрика. Из табл. 28 видно, что интенсивность отказов  $\lambda$  больше для конденсаторов большей емкости. Поэтому для однослойных металlobумажных конденсаторов правильнее учитывать интенсивность отказов, отнесенную к единице емкости,

$$\lambda_C = \frac{n}{N\tau C} [\text{мкф}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}]. \quad (43)$$

В табл. 28 приведены  $\lambda_C$  и средние значения интенсивности отказов  $\lambda_{C \text{ ср}}$  для нескольких партий однотипных конденсаторов, испытывающихся в одинаковых условиях.

Измерения температурного коэффициента электрического сопротивления на конденсаторах с пониженным сопротивлением изоляции, проведенные В. И. Скрипкиным, показали, что у отдельных образцов сопротивление повышается с повышением температуры, и температурный коэффициент электропроводности близок к температурному коэффициенту чистого металлического цинка.

Следует заметить, что наибольшее число случаев снижения сопротивления изоляции и наибольшая частота пробоев однослойных конденсаторов наблюдается в процессе изменения температуры или в первые часы работы при повышенной температуре.

Вышеприведенные наблюдения позволяют сделать некоторые предположения о причинах и механизме снижения сопротивления изоляции однослойных металлобумажных конденсаторов.

1. Секции при закладке в корпуса, с целью устранения возможного их перемещения, уплотняются прокладками. Созданные при этом в секции механические напряжения перераспределяются в процессе хранения и эксплуатации по отдельным виткам, вызывая их перемещения. В однослойном диэлектрике металлобумажных конденсаторов имеется значительное число включений с высокой электропроводностью, что приводит к необходимости тренировки секции после пропитки для изолирования этих включений от обкладок.

При удалении металлического слоя вокруг включения, в процессе тренировки, на изолированном участке бумаги могут оставаться проводящие мостики из частиц металла, полупроводящих окислов или обугленных волокон бумаги, которые соединены с обкладками электрически и очень близко подходят к мосту расположения включения. При незначительных перемещениях витков секции дефектное место диэлектрика может снова электрически присоединиться к обкладке через один из таких мостиков, причем сопротивление изоляции конденсатора резко снизится и даже может произойти короткое замыкание обкладок.

2. В процессе тренировки конденсаторов происходит разрушение обкладок вблизи места короткого замыкания с возникновением дуги и образованием газов. Если для газов нет свободного выхода, что обусловлено наличием пропиточной массы в конденсаторной секции, то происходит быстрое возрастание удельного давления до тех пор, пока не гаснет дуга. Сжатые газы при большом давлении раздвигают соседние слои диэлектрика и обкладок и нередко разрушают их. После гашения дуги газы охлаждаются, конденсируются или адсорбируются и их давление падает, но диэлектрик, пропитанный церезином, не может мгновенно вернуться в первоначальное положение. Исходное положение слоев бумаги восстанавливается

постепенно. В результате этих небольших перемещений также возможно образование участков с высокой электропроводностью и даже короткое замыкание обкладок.

3. Под действием электрического поля и повышенной температуры происходят необратимые химические и механические изменения изолирующего материала, приводящие к местному возрастанию проводимости, которое может закончиться пробоем диэлектрика.

4. Цинковые обкладки, нанесенные на диэлектрик под вакуумом в виде тонкого слоя, в первый момент имеют мелкокристаллическую структуру. В процессе хранения металлизированной бумаги наблюдается рост кристаллов; внешне это явление проявляется в виде упрочения слоя металла на диэлектрике. Явление перемещения атомов цинка в связи с ростом кристаллов принято называть миграцией металла.

В последнее время многими исследователями наблюдался рост крупных нитевидных кристаллов — «усов» на тонких гальванических покрытиях из цинка, кадмия, олова и его припоев, а также на бумаге, металлизированной цинком и кадмием.

Н. П. Барштейн указывает, что скорость самопроизвольного роста усов очень мала — около 1 мм в год. Однако, если учесть, что толщина диэлектрика очень мала, обычно менее 10 мк, то даже при такой малой скорости, при благоприятных условиях, кристаллы могут прорасти сквозь всю толщину диэлектрика за такое время, которое будет малым в сравнении с требуемым сроком службы металлобумажного конденсатора. При этом может произойти или прямое короткое замыкание обкладок или резкое падение сопротивления изоляции.

## **§ 41. Старение многослойных конденсаторов**

Многослойные конденсаторы имеют значительно более стабильное сопротивление изоляции, чем однослойные. Если в одном из слоев многослойного диэлектрика образуется точка с высокой электропроводностью, то исключительно мала вероятность, чтобы такая же точка образовалась в этом же месте в другом слое. В результате длительных испытаний было установлено, что даже и при температуре 100° С у конденсаторов с многослойной изоляцией не обнаруживается образцов с пониженным сопротивлением.

Поскольку сопротивление изоляции многослойных конденсаторов весьма устойчиво, то их старение при тех же условиях, что и для однослойных, проявляется значительно позже и характеризуется уже не падением постоянной времени, а снижением емкости или ростом тангенса угла потерь. После длительной эксплуатации заметно значительное разрушение обкладок на всей их активной площади. В меньшей степени обкладки разрушаются на краю бумажной ленты, где отсутствует электрическое поле.

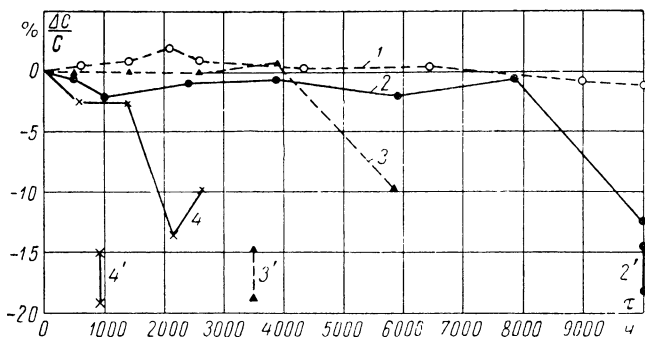


Рис. 87. Зависимость емкости многослойных металlobумажных конденсаторов от времени эксплуатации при различных температурах и различной напряженности поля

1 — 70° С при 48,8 кВ/мм; 2 — 85° С при 32,2 кВ/мм; 3 — 100° С при 26,8 кВ/мм; 4 — 120° С при 17,6 кВ/мм; вертикальными линиями 2', 3' и 4' показаны значения срока службы, полученные расчетом (Торощин).

На рис. 87 показано изменение емкости многослойных конденсаторов в процессе длительных испытаний при различных температурах. Из рисунка видно, что процессы старения многослойных металlobумажных конденсаторов ускоряются с повышением температуры.

Американский исследователь Мак-Лин пришел к выводу, что обкладки металlobумажных конденсаторов разрушаются вследствие электролитического процесса и переноса металла с анода. Этот процесс подчиняется закону Фарадея, т. е. количество металла, потерянного анодной обкладкой, пропорционально прошедшему количеству электричества:

$$-\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{U\varepsilon M}{6,4DR_{из}Cn\gamma}, \quad (44)$$

где  $\delta$  — толщина металлического слоя, Å;  
 $\tau$  — время, сутки;  
 $U$  — приложенное напряжение, в;  
 $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  
 $M$  — атомный вес металла;  
 $n$  — валентность металла;  
 $\gamma$  — плотность металла;  
 $D$  — толщина диэлектрика, мк;

$R_{из}C$  — постоянная времени конденсатора, Мом · мкф.

Формула (44), предложенная Мак-Лином, подтверждается не полностью. На участках, где поле отсутствует, разрушение обкладок также достаточно заметно. При температуре 125° С и выше цинковые обкладки металлобумажных конденсаторов без наложения электрического поля разрушаются за 200—300 часов.

Таким образом, хотя электрохимический характер разрушения обкладок несомненно преобладает в конденсаторах, находящихся под воздействием постоянного напряжения, особенно при повышенной температуре, но он не может проявиться при старении конденсаторов в отсутствии поля, когда разрушение обкладок также происходит. По-видимому, старение многослойных конденсаторов происходит не только от прямого воздействия электрического поля, но и вследствие необратимых химических и механических изменений изолирующего материала и обкладок, не связанных непосредственно с наличием поля.

Количественно трудно оценить химические изменения диэлектрика и обкладок под воздействием температуры, поэтому мы поставили себе более узкую задачу: экспериментально установить влияние температуры и электрического поля на срок службы конденсаторов.

При одновременном воздействии температуры и напряжения электролитический механизм разрушения обкладок является преобладающим. Поэтому для развития процесса старения должна быть характерной электропроводность диэлектрика (или обратная ей величина сопротивление изоляции), так как зависящий от них ток утечки определяет количество ионов, движущихся через толщу диэлектрика и уносящих металл с анодной обкладки.

Пользуясь зависимостью электропроводности от напряженности электрического поля и от температуры, нельзя определить абсолютную величину срока службы конденсатора; однако, если экспериментально найдена ве-

личина срока службы при определенных значениях температуры и напряженности поля, то этот срок службы можно пересчитать для любых других условий работы многослойных металlobумажных конденсаторов той же конструкции. Результаты такого пересчета можно проверить путем определения срока службы при других значениях температуры и напряженности поля.

## § 42. Зависимость срока службы металlobумажных конденсаторов от температуры и напряженности поля

Согласно сказанному выше, сроки службы металlobумажных конденсаторов в заданном интервале температур и напряженностей поля должны изменяться в соответствии с изменением сопротивления изоляции в этом же интервале. Для приближенных подсчетов можно поэтому зависимость срока жизни от этих факторов выразить уравнением, аналогичным тому, которое определяет зависимость сопротивления изоляции от температуры и напряженности поля.

Изменение сопротивления изоляции (постоянной времени) металlobумажных конденсаторов в зависимости от температуры при различных значениях напряженности поля показано на рис. 63 и математически выражается уравнением (33).

В соответствии с указанным выше, зависимость срока службы  $\tau$  от температуры можно выразить аналогичным уравнением:

$$\tau_t = \tau_0 e^{-\alpha(t-t_0)}, \quad (45)$$

где  $\tau_0$  — срок службы конденсаторов при температуре  $t_0$ .

Изменение сопротивления изоляции металlobумажных конденсаторов в зависимости от напряженности поля при различных температурах (см. рис. 64) математически характеризуется уравнением (34).

Зависимость срока службы металlobумажных конденсаторов от напряженности поля по аналогии может быть выражена уравнением:

$$\tau_E = \tau'_0 e^{-\alpha(E-E_0)}, \quad (46)$$

где  $\tau'_0$  — срок службы конденсаторов при напряженности поля  $E_0$ .

Зависимость срока службы конденсаторов от суммарного воздействия напряженности поля и температуры может быть выражена уравнением, подобным (35):

$$\tau = \tau_0'' e^{-[\alpha(t-t_0) + \beta(E-E_0)]}, \quad (47)$$

где  $\tau_0''$  — срок службы конденсаторов при температуре  $t_0$  и напряженности поля  $E_0$ .

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  те же, что и в уравнениях (33) и (34) и, соответственно, равны 0,086 и 0,045.

Испытания многослойных конденсаторов, проведенные при температуре  $85^\circ$  и напряженности поля  $35 \text{ кВ/мм}$  и продолжавшиеся до получения снижения емкости на 20 %, которое произошло через 8500 часов, позволили заменить в уравнении (47) величины  $\tau_0''$ ,  $t_0$  и  $E_0$  численными значениями, в результате чего уравнение упрощается:

$$\tau = 61 \cdot 10^6 e^{-(\alpha t + \beta E)}. \quad (48)$$

Пользуясь уравнением (48), можно подсчитать срок службы металлобумажных конденсаторов с многослойной изоляцией при любых температурах и напряженностях поля, если при вновь заданных условиях не возникает электрического или теплового пробоя.

Уравнением можно также пользоваться для ускоренной оценки качества выпускаемой партии конденсаторов. Так, например, если повысить температуру до  $150^\circ \text{C}$ , а напряженность поля принять равной  $10 \text{ кВ/мм}$  и если в этих условиях не наступает теплового или электрического пробоя конденсаторов, то срок службы при таком ускоренном испытании снижается до 96 часов; это значение легко проверить экспериментально.

Результаты испытания многослойных металлобумажных конденсаторов при температуре  $+85$ ,  $100$  и  $120^\circ \text{C}$  показывают удовлетворительное совпадение расчетных данных с опытными (см. рис. 87). Расчетный срок службы на рисунке показан вертикальными линиями.

Партии конденсаторов с меньшим сроком службы, по-видимому, были изготовлены с отступлениями от правильной технологии и имели более низкое качество, чем те, по которым было определено значение  $\tau_0''$ .

Уравнение (48) устанавливает зависимость между температурой, напряженностью поля и сроком службы многослойных металлобумажных конденсаторов. Срок службы

в данном случае определяется необратимыми химическими, электрохимическими и механическими процессами, протекающими во время эксплуатации конденсаторов.

В однослойных конденсаторах, кроме вышеуказанных факторов, появляется влияние роста кристаллов цинка и постепенное снятие остаточных деформаций, образовавшихся в секциях вследствие частичных пробоев и механических напряжений. Влияние факторов старения, установленных для однослойных конденсаторов, так же как и факторов, установленных для многослойных конденсаторов, усиливается с повышением температуры и напряженности поля. Это усиление в первом приближении можно считать пропорциональным изменению электропроводности диэлектрика.

Поэтому уравнение (47), по-видимому, может также быть использовано для приближенного определения зависимости количества выходов (или интенсивности отказов) однослойных конденсаторов по потере сопротивления изоляции от температуры и напряженности поля.

Если с повышением температуры срок службы снижается, то количество конденсаторов, снизивших сопротивление изоляции, увеличивается, поэтому уравнение (47) должно быть записано в виде обратной зависимости:

$$\lambda = \lambda_0'' e^{\alpha(t-t_0) + \beta(E-E_0)}, \quad (49)$$

где  $\lambda_0''$  — интенсивность отказов при температуре  $t_0$  и напряженности поля  $E_0$ .

При испытании конденсаторов с номинальными данными 30 мкф и 160 в при температуре 60° (без приложения напряжения) значение  $\lambda$  было найдено равным  $8,7 \cdot 10^{-5}$ ; при этом дефектными считались образцы, имеющие постоянную времени ниже 30 Мом·мкф.

Если сделать допущение, что в конденсаторе с емкостью до 30 мкф происходит образование только одной точки с высокой электропроводностью, то значение  $\lambda_{0c}$  для конденсаторов емкостью 1 мкф будет составлять  $0,290 \times 10^{-5} \text{ мкф}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ . Для конденсаторов с двухсторонней лакировкой (по результатам испытания конденсаторов емкостью 2 и 10 мкф при температуре 85° С)  $\lambda'_{0c}$  равно  $1,86 \cdot 10^{-5} \text{ мкф}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ .

Пользуясь этими данными, получаем:

а) для конденсаторов с односторонней лакировкой

$$\lambda_c = 1,6 \cdot 10^{-8} C e^{\alpha t}, \quad (50)$$

где  $C$  — емкость,  $\text{мкф}$ ;

б) для конденсаторов с двухсторонней лакировкой

$$\lambda'_c = 1,23 \cdot 10^{-8} C e^{\alpha t}. \quad (51)$$

Для однослойных конденсаторов значение  $\alpha$  можно принять равным 0,075 (§ 31).

Пользуясь этими уравнениями, можно приблизительно подсчитать возможное количество конденсаторов, снижающих сопротивление изоляции ниже нормы, если испытание проходит с наложением напряжения меньше 5 в. Напряжение, превышающее 5 в, будет воздействовать на однослойные конденсаторы, с одной стороны, как фактор, снижающий сопротивление изоляции, а с другой, как фактор тренировки, т. е. часть конденсаторов при таком напряжении будет пробиваться и восстанавливать сопротивление изоляции до значения, близкого к первоначальному. Количество образцов, восстанавливающих высокое значение сопротивления, будет увеличиваться с повышением напряжения (см. табл. 29).

Используя средние данные по испытанию конденсаторов с номинальным напряжением 160 в, емкостью 1; 15 и 30  $\text{мкф}$ , исследованных при температуре 60° С с наложением номинального напряжения, при котором интенсивность отказов составляла  $\lambda_{0c} = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ , был найден коэффициент  $m$ , характеризующий зависимость интенсивности отказов (снижение постоянной времени ниже 30  $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$ ) от напряженности поля.

В этом случае уравнения, характеризующие комбинированную зависимость интенсивности отказов от температуры и напряженности поля, приобретают вид:

а) для конденсаторов с односторонней лакировкой

$$\lambda_c = 1,6 \cdot 10^{-8} C e^{\alpha t + m\beta E}; \quad (52)$$

б) для конденсаторов с двухсторонней лакировкой

$$\lambda_c = 1,23 \cdot 10^{-8} C e^{\alpha t + m\beta E}, \quad (53)$$

где  $\alpha = 0,086 \text{ град}^{-1}$ ;

$\beta = 0,045 \text{ мм/кв}$ ;

$m = 0,331$ .

Пользуясь уравнениями (52) и (53), можно подсчитать интенсивность возможных отказов однослойных металлобумажных конденсаторов при различных температурах и напряженностях поля. Используя коэффициент восстановления сопротивлению изоляции при различных напряжениях (см. табл. 29), можно подсчитать и частоту частичных пробоев.

Расчетные значения интенсивности отказов  $\lambda_{C \text{ рас}}$  для различных партий конденсаторов, испытываемых в различных условиях, приведены в табл. 28. Сопоставляя расчетные данные с опытными, приведенными в той же таблице, можно убедиться в удовлетворительном их совпадении. Различие в экспериментальных значениях  $\lambda_C$  для однотипных конденсаторов, испытываемых в одинаковых условиях, говорит о различном качестве этих партий по сохранности сопротивления изоляции во время эксплуатации.

Метод подсчета интенсивности отказов (по снижению сопротивления изоляции ниже нормы) и частоты частичных пробоев может быть также использован для периодической проверки качества выпускаемых конденсаторов путем сопоставления результатов периодических испытаний с полученными данными, приведенными выше.

### **§ 43. Зарубежные исследования старения и надежности металлобумажных конденсаторов**

Широкое распространение металлобумажных конденсаторов в зарубежной практике вызывает интерес к проблеме их надежности, в связи с чем за последние годы в зарубежной литературе был опубликован ряд работ по этому вопросу.

Наибольшее число таких работ можно найти в литературе, издаваемой в ФРГ, так как современный металлобумажный конденсатор с обкладками, нанесенными испарением в вакууме, впервые был разработан германскими исследователями.

В обзорной работе Гала, рассматривающей проблему надежности конденсаторов различных типов, указывается, что при исследовании металлобумажных конденсаторов влияние влаги на их старение можно не учитывать, так как они, в принципе, всегда должны иметь герметизированную конструкцию. Характерным признаком процесса старения металлобумажного конденсатора он считает сни-

жение емкости, которое будет тем больше, чем выше напряжение, приложенное к конденсатору. За 3000 часов при напряжении  $1,25 U_{\text{ном}}$  потеря емкости составляет около 1%, при  $1,75 U_{\text{ном}}$  4% и при  $2,5 U_{\text{ном}}$  8%. Дальнейшее увеличение времени выдержки под напряжением свыше 3000 часов по данным этого исследователя уже не дает снижения емкости. В процессе старения наблюдался также рост  $\text{tg } \delta$ . Математическую зависимость между ухудшением свойств металлобумажного конденсатора и временем, температурой и напряжением в процессе старения в этой работе установить не удалось.

В работе Штрёба приводятся результаты испытания металлобумажных конденсаторов емкостью 2 мкф и номинальным рабочим напряжением 500 в (постоянный ток). Испытание продолжалось в течение 10 000 часов. Было установлено, что в процессе старения снижается емкость конденсаторов и притом тем сильнее, чем выше температура и напряжение; по мнению Штрёба снижение емкости обусловлено развитием электролитических процессов, а потому увеличение тока утечки, которое вызывается как повышением температуры, так и повышением напряжения, должно способствовать ускорению процесса разрушения обкладки и увеличивать потерю емкости. Сопротивление изоляции конденсаторов в процессе старения изменялось относительно мало, а угол потерь имел тенденцию к медленному возрастанию. В качестве критерия, определяющего срок службы металлобумажного конденсатора Штрёб предлагает принять предельно допустимое снижение емкости. Время, необходимое для того, чтобы емкость уменьшилась на определенную заданную величину, зависит от приложенного к конденсатору напряжения. Эту зависимость можно выразить формулой:

$$\tau = \tau_0 \left( \frac{U_0}{U} \right)^n, \quad (54)$$

где  $\tau$  — искомый срок службы при некотором напряжении  $U$ ;  $\tau_0$  и  $U_0$  соответственно время и напряжение, для которых уже известно снижение емкости из ранее проведенных опытов; значение показателя степени  $n$  равно 6,2.

При использовании металлобумажных конденсаторов в цепях переменного тока критерием срока службы должно служить возрастание угла потерь до такого значения, при

котором теряется тепловая стабильность конденсатора, т. е. может наступить его тепловой пробой. В данном случае повышение напряжения и температуры окружающей среды также должно ускорять процесс старения металлобумажного конденсатора, но пока неясно, в какой степени при этом сохраняются закономерности, полученные при постоянном напряжении, поскольку для оценки срока службы здесь приходится выбирать уже другой критерий — не потерю емкости, а рост угла потерь.

Обширная работа по исследованию старения и надежности работы металлобумажных конденсаторов была опубликована Акманом, работником фирмы «Лоренц» (ФРГ). Он задался целью получить такие данные, которые позволили бы проводить экстраполяцию значений срока службы от нескольких тысяч часов до времени, превышающего 10 лет. Для исследования им были выбраны двухслойные конденсаторы, испытание которых проводилось при пяти значениях: 200, 280, 400, 560 и 800 в (соответственно 1,25; 1,75; 2,5; 3,5 и 5  $U_{ном}$ ) и при трех значениях температуры: 75, 85 и 95° С. Максимальное значение температуры испытания ограничивалось температурой плавления пропиточной массы. Испытуемые конденсаторы были собраны в цилиндрических алюминиевых корпусах и имели номинальную емкость 4 мкф. Для каждого варианта напряжения и температуры испытывалось по 50 штук конденсаторов. Влияние температуры испытания определялось при напряжении 400 в. Зависимость емкости, выраженной в процентах от исходного значения, от времени испытания при напряжении 2,5  $U_{ном}$ , показана на рис. 88, а. Цифры у кривых указывают температуру, при которой проводилось испытание. Анализ этой зависимости приводит к следующему выражению:

$$C_{\tau} = 100 - \left( \lg \tau_x - \lg 6 \cdot 10^3 \exp - \frac{t - 65}{5,42} \right) \times \\ \times \frac{t}{95} \cdot 3^{\frac{t}{95}}, \quad (55)$$

где  $C$  — емкость;

$\tau$  — время;

$t$  — температура.

После некоторого времени активации, порядка 100 час, когда емкость держится стабильной, снижение ее идет

со скоростью 2% на каждое изменение времени испытания в 10 раз (на один порядок величины); эти данные соответствуют температуре 85° С и напряжению 400 в, т. е.  $2,5 U_{\text{ном}}$ . Акман считает, что изменение емкости нельзя брать за критерий старения, так как в нормальных условиях работы оно весьма незначительно. Если считать, что конденсаторы будут использоваться при температуре 85° С и напряжении 250 в (примерно  $1,5 U_{\text{ном}}$ ), то заметное снижение емкости, в соответствии с найденной закономер-

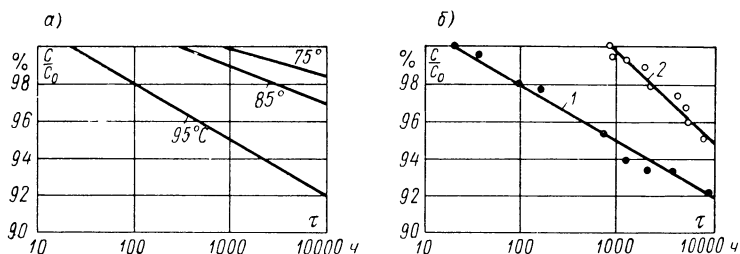


Рис. 88. Зависимость емкости металлобумажных двухслойных конденсаторов от времени их эксплуатации: а — негерметизированные конденсаторы при напряжении  $2,5 U_{\text{ном}}$ ; влияние температуры (цифры у кривых); б — испытание при  $2,5 U_{\text{ном}}$  и 95° С

1 — негерметизированные конденсаторы; 2 — герметизированные (Акман)

ностью, произойдет только через 100 000 часов работы, причем изменение емкости еще нельзя считать существенным, так как конденсаторы выпускают с допускаемым отклонением емкости от номинала, равным  $\pm 10\%$ .

Следует иметь в виду, что эти данные соответствуют не полностью герметизированной конструкции (пластмассовые крышки с резиновым уплотнением) с влагостойкостью класса F по нормам DIN 40040; для конденсаторов с вакуумплотной герметизацией изменения емкости со временем еще меньше, как показывает рис. 88, б.

Тангенс угла потерь, как и емкость, относительно мало изменяется в процессе старения, как показывают данные рис. 89. Средние значения  $\text{tg } \delta$  для образцов, исследованных при температуре 95° С, начинают заметно возрастать только после нескольких тысяч часов; при температурах 75 и 85° С среднее значение  $\text{tg } \delta$  даже после времени испытания 10 000 часов сохраняет установившееся значение, хотя отдельные образцы могут несколько увеличивать

угол потерь (в данном случае имеется в виду значение  $\operatorname{tg} \delta$ , которое измерялось при комнатной температуре во время перерывов в испытании так же, как и значение емкости на приведенных выше рисунках). Напряжение не влияло на величину угла потерь и характер его изменения при старении; точки, измеренные при разных напряжениях, ложились на одну и ту же кривую зависимости угла потерь от времени.

В качестве критерия для установления срока службы металlobумажных конденсаторов Акман предлагает при-

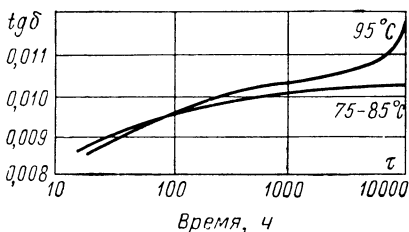


Рис. 89. Зависимость тангенса угла потерь металlobумажных конденсаторов от времени эксплуатации при температурах 75—85° С и 95° С (Акман).

нять величину постоянной времени (поскольку емкость изменяется очень мало, это то же самое, что сопротивление изоляции). Постоянная времени изменяется незакономерно и характеризуется «выпадами» для отдельных образцов, которые резко снижают эту характеристику в сравнении с остальными образцами, входящими в одну и ту же партию. По нормам VDE 0560 после 250 часов испытания при  $0,9 U_{\text{ном}}$  постоянная времени должна быть не ниже  $700 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ . При 20° С, приняв эту величину за критерий, по отношению к которому учитывались выпадения, Акман нашел зависимость числа годных конденсаторов от времени испытания при  $2,5 U_{\text{ном}}$  и трех значений температуры, показанную на рис. 90. В течение первых 300 часов при температуре 95° С и в течение времени около 10 000 часов при температурах 75 и 85° С количество выпадений невелико и сравнительно медленно увеличивается со временем; по истечении этого начального периода количество выпадений резко возрастает во времени (количество оставшихся годными образцов резко падает). Можно думать,

что в данном случае мы имеем дело с двумя различными механизмами старения.

Задавшись допусκαемым количеством выходов, равным 1 %, Акман получил зависимость допускаемого рабочего напряжения от срока службы при трех значениях температуры, показанную на рис. 91. Если задаться таким допустимым количеством образцов с дефектным сопротивле-

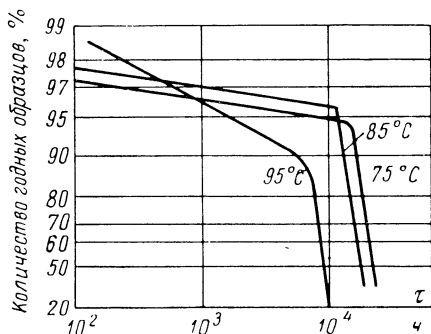


Рис. 90. Зависимость числа образцов металлобумажных конденсаторов, сохранивших постоянную времени при 20° С выше 700 Мом·мкф, от времени эксплуатации при трех значениях температуры (цифры у кривых) (Акман).

нием изоляции, то при напряжении 200 в ( $1,25 U_{\text{ном}}$ ) и температуре 95° С срок службы будет составлять примерно 3000 часов; при напряжении 400 в срок службы сокращается до 1600 часов. При температуре 85° С сроки службы заметно увеличены: при 200 в до 13 000 часов, а при 400 в до 9000 часов. Снижение температуры до 75° С дает относительно небольшое увеличение срока службы в сравнении с его значением при 85° С.

Следует напомнить, что сильное влияние температуры 95° С на характер старения было замечено также и при исследовании угла потерь. При температуре 40° С, которая рекомендована МЭК для установления номинального напряжения радиоконденсаторов, срок службы превышает 40 000 часов, при выпадках менее 1 % (напряжение 200 в). Это соответствует интенсивности отказов порядка  $1 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ .

Время, после которого наблюдается перегиб кривых на рис. 91, т. е. переход ко второму ускоренному механизму старения, зависит от емкости образца по следующему закону:

$$\tau = 3800 C^{0.38} \quad (\text{при } 400 \text{ в и } 95^\circ \text{ C}), \quad (56)$$

где  $\tau$  — в ч и  $C$  — в мкф.

Интересно отметить, что близкий характер влияния номинальной емкости образца был отмечен также для того времени, которое вызывает потерю емкости, равную 10%:

$$\tau = 5000 C^{0.4}. \quad (57)$$

Это свидетельствует о том, что в обоих случаях мы имеем дело с близким механизмом разрушения, очевидно, электролитического характера.

Среди работ по изучению старения металлобумажных конденсаторов, выполненных в других странах, кроме ФРГ, можно отметить работу Ламфье, сотрудника фирмы «Спрэйг» (США). По его мнению, надежность металлобумажного конденсатора определяется стабильностью его емкости, стабильностью угла потерь (указывающей на надежность контактного узла) и стабильностью постоянной времени (указывающей на малое число самозалечивающихся пробоев, происходящих во время работы конденсатора). Так же, как и Акман, этот американский исследователь отмечает, что среднее значение постоянной времени менее характерно для оценки качества конденсаторов, чем кривая распределения этой характеристики. Например, в одной партии конденсаторов при среднем значении  $9000 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$  число образцов, имевших постоянную времени ниже  $2000 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ , составляло

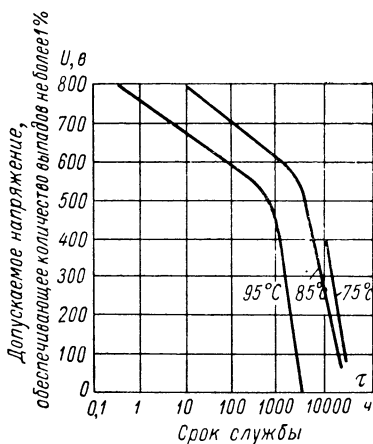


Рис. 91. Зависимость между сроком службы и допустимым напряжением, обеспечивающим выход из строя по сопротивлению изоляции не более 1%, при трех значениях температуры для двухслойных металлобумажных конденсаторов (Акман).

менее 1%; в другой партии, имевшей более высокое среднее значение этой характеристики, равное 11 000 *Мом·мкф*, количество выпадов со значением менее 2000 *Мом·мкф* оказалось равным 35%.

Проверку надежности контактного узла Ламфье предлагает проводить путем измерения угла потерь после многократных разрядов конденсатора, производимых замыканием его накоротко. Сравнение двух партий конденсаторов по 6 штук в каждой с вполне доброкачественным контактным узлом и дефектным узлом дало следующие результаты:

а) доброкачественная партия: после 1000 разрядов изменения  $C$  и  $\operatorname{tg} \delta$  не обнаружено, после 2000 разрядов у одного из 6 образцов емкость упала на 13%, но  $\operatorname{tg} \delta$  не изменился; увеличение количества разрядов до 25 000 не показало дальнейшего изменения характеристик;

б) дефектная партия: после 5 разрядов 2 образца из 6 испытуемых увеличили  $\operatorname{tg} \delta$  от величины 0,0035 до 0,017—0,037; после 10 разрядов таких образцов уже стало 4; после 50 разрядов 5 образцов из шести дали полный обрыв контакта между обкладкой и выводом.

Ламфье считает, что качество контактного узла можно надежно проверить, дав конденсатору 50 разрядов накоротко. Испытание на ускоренное старение проводилось при  $1,5 U_{\text{ном}}$  и максимальной рабочей температуре. Проверялись конденсаторы емкостью 0,1—10 *мкф* с рабочими напряжениями 200, 400 и 600 в и номинальной температурой 85 и 125° С. Всего было испытано 168 образцов, причем за 1000 часов испытания только один дал выпад по снижению постоянной времени ниже нормы 2000 *Мом·мкф* (при 20° С). Это соответствует выходу менее 0,6%. Для определения количества импульсов самовосстановления было испытано 60 конденсаторов; за 26 000 штукo-часов при максимальной рабочей температуре было отмечено 104 импульса, т. е. в среднем 1 импульс за каждые 260 часов; применяя закон пятой степени, получаем для номинальных условий работы 1 импульс на каждые 2000 часов работы.

Для проверки надежности при малых напряжениях было испытано 42 образца при напряжении 2 в, причем резкое снижение сопротивления могло быть установлено точным прибором для регистрации толчков тока; при общем объеме испытания 46 828 штукo-часов ни одного вы-

пада не произошло, хотя некоторым образцам давались температурные циклы от  $-55$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Существенных остаточных изменений не было установлено также при хранении без напряжения в течение 13 000 часов при 20 и  $125^{\circ}\text{C}$ .

На основании проведенных исследований Ламфье отмечает, что как теоретически, так и практически металлобумажный конденсатор можно считать потенциально наиболее надежным из всех типов конденсаторов.

Английские исследователи Нью и Линч рассмотрели интересный вопрос о работе однослойных металлобумажных конденсаторов в таких цепях, где последовательно с конденсатором включается большое сопротивление, что затрудняет протекание процесса самовосстановления при пробое, так как ограничивается величина силы тока, протекающего по обкладкам конденсатора при их коротком замыкании.

Подверглись испытанию однослойные конденсаторы с номинальным напряжением 150 в, емкостью 0,5 и 2 мкф. Для ускорения развития электрохимических явлений, характеризующих старение конденсатора, опыт проводился при температуре  $40^{\circ}\text{C}$  и напряжениях 40 и 80 в. Последовательно с каждым образцом включалось сопротивление 1 Мом. Для всех трех групп испытанных конденсаторов (от трех различных поставщиков) наблюдалось снижение сопротивления изоляции, особенно заметное при воздействии напряжения 80 в. Наихудшие образцы дали следующие результаты: при напряжении 40 в после одного года испытания были получены значения 9 и 16 Мом; при напряжении 80 в через 6 месяцев были зарегистрированы значения 0,7 и 2 Мом; через 2,5 года наименьшие значения сопротивления изоляции в исследованных партиях составляли 3 и 7 Мом. При напряжении 40 в было установлено определенное преимущество в поведении образцов с обкладками из алюминия в сравнении с образцами, имевшими обкладки из цинка; при напряжении 80 в это различие оказалось менее заметным.

Нью и Линч провели математическое рассмотрение явлений, сопровождающих процесс самовосстановления при наличии ограничивающего сопротивления, основываясь на том, что выделяемая энергия при разряде через дефект в диэлектрике должна быть достаточна для испарения металла вокруг дефекта и изолирования последнего, но

не должна быть настолько велика, чтобы вызвать обугливание диэлектрика и образование сохраняющегося проводящего мостика. Их расчеты показали, что для испарения диска из металла диаметром  $0,4 \text{ мм}$  и толщиной  $5 \cdot 10^{-6} \text{ мм}$  в случае алюминия требуется  $5 \cdot 10^{-4} \text{ дж}$ , а в случае цинка  $2 \cdot 10^{-4} \text{ дж}$ . Расход энергии в  $1 \text{ сек}$  для поддержания мест нагрева при температуре кипения металла примерно одинаков как для алюминия, так и для цинка и составляет около  $0,1 \text{ дж}$ .

Эту энергию нельзя подвести из внешней цепи, если напряжение менее  $100 \text{ в}$ , а последовательное ограничивающее сопротивление более  $100 \text{ ком}$ ; в этом случае надо рассчитывать только на запас энергии в самом конденсаторе.

По мнению Нью и Линча процесс самовосстановления занимает время менее  $10 \text{ мксек}$  (порядка  $4 \text{ мксек}$ ); этой скорости процесса должно соответствовать сопротивление пути разряда порядка  $2 \text{ ком}$  или даже менее, тогда как до начала разряда оно более  $1 \text{ Мом}$ . По их представлениям рассматриваемый процесс проходит через следующие стадии своего развития:

- 1) медленное снижение сопротивления изоляции конденсатора, приводящее к постепенному возрастанию тока утечки и снижению напряжения на зажимах конденсатора, включенного последовательно с резистором, имеющим большое сопротивление;

- 2) быстрое снижение сопротивления изоляции до величины менее  $1 \text{ ком}$ ;

- 3) разряд через путь низкого сопротивления, испаряющий металл вокруг дефектного места.

Максимально допускаемое значение сопротивления ограничивающего резистора должно обеспечивать конденсатору во второй стадии достаточный заряд. Резкое снижение сопротивления пути разряда происходит при рассеянии мощности порядка  $2 \text{ мвт}$ ; при емкости  $0,5 \text{ мкф}$  и напряжении  $80 \text{ в}$ , при наличии резистора  $1 \text{ Мом}$ , рассеянная мощность составляет  $1,6 \text{ мвт}$  и запасенная энергия конденсатора порядка  $4 \cdot 10^{-4} \text{ дж}$ .

Нью и Линч делают вывод о том, что самовосстановление в данном случае будет возможно, если запас энергии в конденсаторе превышает  $5 \cdot 10^{-4} \text{ дж}$  или если из внешней цепи может поступить ток порядка  $100 \text{ ма}$ . Они составили таблицу допускаемых значений последовательно включаемого сопротивления для металлобумажных конденсаторов

емкостью от 0,1 мкф до 5 мкф или выше при напряжениях от 150 до 50 в. Эта таблица рекомендуется для практического применения и обеспечивает возможность самовосстановления в конденсаторах при наличии последовательно включенного резистора.

#### **§ 44. Изменение характеристик металlobумажных конденсаторов в процессе хранения**

Для полного представления об эксплуатационных характеристиках металlobумажных конденсаторов необходимо знать не только изменение их параметров в процессе эксплуатации, но также и при хранении, так как большинство радиотехнических устройств работает с перерывами, продолжительность которых может достигать нескольких месяцев и даже лет.

Поэтому наряду с изучением старения металlobумажных конденсаторов в процессе их эксплуатации проводят также наблюдения за изменениями их характеристик в процессе хранения. Для этой цели периодически проверяют электрические характеристики конденсаторов, хранящихся в различных условиях.

Результаты таких наблюдений следует рассмотреть отдельно для однослойных и многослойных конденсаторов, так как изменение параметров будет различным в зависимости от того, один или несколько слоев бумаги составляют диэлектрик конденсатора.

##### **Однослойные конденсаторы**

Испытание на хранение однослойных металlobумажных конденсаторов производилось:

- 1) в естественных условиях Ленинградской области, причем конденсаторы были защищены от дождя и снега;
- 2) в комнатных условиях;
- 3) при температуре  $-(2-6)^{\circ}\text{C}$ ;
- 4) при температуре  $+(2-4)^{\circ}\text{C}$ .

При хранении металlobумажных конденсаторов в естественных условиях они были упакованы в ящики с отверстиями в боковых стенках и хранились под навесом, где на конденсаторы не попадали выпадающие осадки. Периодически производилось измерение электрических характеристик конденсаторов; результаты наблюдений приведены на рис. 92.

Из рисунка видно, что за 5 лет хранения не происходит существенных изменений электрических характеристик. Лишь отдельные образцы в течение первых двух лет снизили сопротивление изоляции ниже нормы, установленной для конденсаторов при выпуске. Количество образцов с пониженным сопротивлением изоляции не превышало 3—5%.

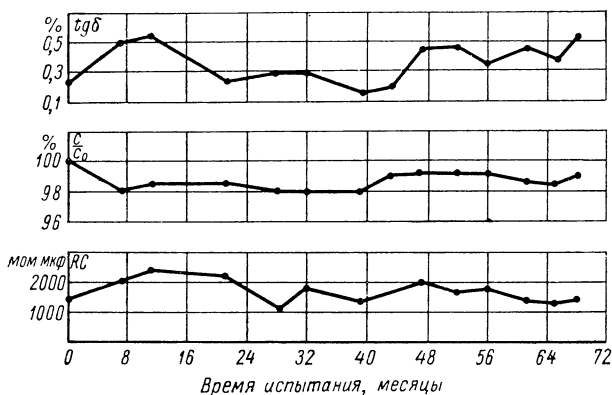


Рис. 92. Зависимость электрических характеристик однослойных металlobумажных конденсаторов от времени хранения в естественных условиях (Вахтель).

Последующие наблюдения, продолжавшиеся с общим сроком до 10 лет, показали, что в сравнении с числом образцов, вышедших из строя по причине снижения сопротивления изоляции за первые 2 года, количество испортившихся конденсаторов при дальнейшем хранении исключительно мало; как правило, при этом выход из строя вызывается проникновением влаги внутрь конденсатора в случае нарушения герметичности заделки корпуса.

Емкость металlobумажных конденсаторов в первые два года хранения в естественных условиях снижается незначительно. Наибольшее снижение емкости обычно не превосходит 2%, в среднем же для партии емкость снижается на 0,5—1%. При дальнейшем хранении снижение емкости не наблюдается. Исключение составляют образцы, потерявшие герметичность, для которых сначала можно наблюдать некоторое увеличение емкости, а затем резкое ее снижение.

Тангенс угла потерь при хранении в естественных условиях, как правило, не изменяется. Исключение также составляют образцы, потерявшие герметичность, а также те образцы, которые имели при изготовлении повышенный тангенс угла потерь, в сравнении с остальными конденсаторами той же партии, хотя бы абсолютные значения  $\operatorname{tg} \delta$  и не выходили за пределы нормы, оговоренной техническими условиями. У образцов, потерявших герметичность, прирост тангенса угла потерь наблюдается через 2—4 месяца; у образцов с повышенным начальным значением  $\operatorname{tg} \delta$  прирост этой характеристики начинался после 6—8 лет хранения.

При хранении в комнатных условиях также наблюдается снижение сопротивления изоляции в первые 2 года. Но у меньшего числа образцов, чем при хранении в естественных условиях. Емкость за первые два года хранения в комнатных условиях также снижается на 0,5—2%, а при дальнейшем хранении остается без заметных изменений. Изменение тангенса угла потерь при хранении в комнатных условиях также менее заметно, чем в естественных.

Опыты, проведенные по хранению однослойных металлобумажных конденсаторов при температуре  $+(2-4)^{\circ}\text{C}$ , а также при температуре  $-(4-8)^{\circ}\text{C}$  показали, что в этих условиях конденсаторы могут длительно храниться без заметного изменения своих электрических характеристик.

При хранении в течение двух лет при температурах  $+(2-4)^{\circ}\text{C}$ , а также  $-(4-8)^{\circ}\text{C}$  не наблюдалось случаев снижения сопротивления изоляции ниже нормы, указанной в технических условиях. Не наблюдалось за этот период и снижения емкости. Хранение при искусственном охлаждении до отрицательных температур связано с созданием высокой относительной влажности, поэтому у образцов конденсаторов, хранившихся в этих условиях, наблюдается более интенсивная коррозия корпусов и выводов.

### Многослойные конденсаторы

Изменение электрических характеристик многослойных металлобумажных конденсаторов в процессе их хранения в естественных климатических условиях приведено на рис. 93.

Сопротивление изоляции у многослойных конденсаторов, как было показано испытаниями при повышенных температурах, значительно стабильнее, чем у однослойных. Это проявляется и при хранении. В этом случае не замечено ни снижения среднего значения сопротивления изоляции, ни падения этой характеристики у отдельных образцов.

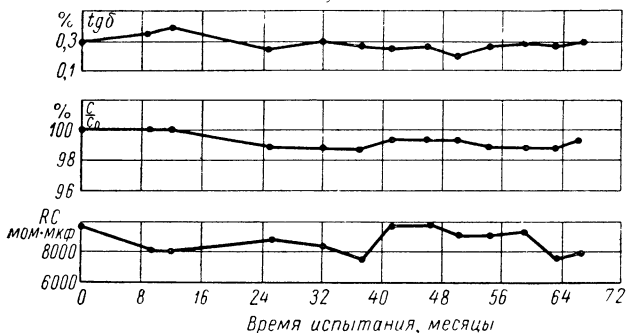


Рис. 93. Зависимость электрических характеристик многослойных металlobумажных конденсаторов от времени хранения в естественных условиях (Вахтель).

Изменение емкости и тангенса угла потерь у многослойных металlobумажных конденсаторов в процессе хранения в естественных условиях примерно такое же, как и у однослойных конденсаторов.

Наблюдение над многослойными конденсаторами, хранившимися при температурах  $+(2-4)^\circ\text{C}$  и  $-(4-8)^\circ\text{C}$ , показывает, что они в обоих случаях хорошо сохраняют свои характеристики, не хуже, чем однослойные конденсаторы.

---

## ГЛАВА СЕДЬМАЯ

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОНДЕНСАТОРОВ С ТОНКИМИ ОБКЛАДКАМИ, НАНЕСЕННЫМИ НА ДИЭЛЕКТРИК

### § 45. Металлопленочные конденсаторы

Преимущества металlobумажных конденсаторов по удельным объемам и эксплуатационным характеристикам способствовали широкому их распространению, однако эти конденсаторы не могли полностью удовлетворить возрастающую потребность в малогабаритных конденсаторах с высокими электрическими характеристиками. Поэтому изыскивались пути замены бумаги диэлектриком с лучшими характеристиками, но при сохранении обкладок в виде тонкого слоя металла, нанесенного на диэлектрик, так как такие обкладки обеспечивают значительное снижение удельных объемов конденсаторов при одновременном повышении надежности их в работе.

В связи с этим была проведена разработка конденсаторов с диэлектриком из металлизированной органической пленки, которые получили название металлопленочных.

В настоящее время в СССР в большом количестве выпускают металлопленочные конденсаторы с диэлектриком из ориентированной полистирольной пленки как с одним, так и с несколькими слоями пленки между обкладками.

Металлопленочные конденсаторы с диэлектриком из одного слоя пленки выпускают с номинальными напряжениями от 160 в до 600 в в цилиндрических и плоских корпусах.

Конденсаторы в цилиндрических корпусах с торцов уплотняются эпоксисмолой, и им присвоено обозначение МПО (металлопленочные однослойные). Конденсаторы в плоских корпусах выпускаются герметично запаянными с керамическими изоляторами, и им присвоено

обозначение МПГО (металлопленочные герметизированные однослойные).

Металлопленочные конденсаторы с диэлектриком из нескольких слоев пленки выпускают с номинальным напряжением от 250 до 1000 в как в цилиндрических, так и в плоских корпусах.

Конденсаторы в цилиндрических корпусах, как и конденсаторы МПО, уплотняют с торцов эпоксисмолой, и им присвоено условное обозначение К71П-2А; конденсаторы в плоских корпусах выпускают герметично запаиваемыми с керамическими изоляторами, и им присвоено обозначение К71П-2Б.

Шкала номинальных значений емкости и напряжения для металлопленочных конденсаторов с диэлектриком из полистирола невелика и ограничивается значениями, приведенными в табл. 30.

Таблица 30

**Металлопленочные конденсаторы с диэлектриком из полистирола**

| Тип конденсатора | Напряжение, в  | Емкость                |
|------------------|----------------|------------------------|
| МПО              | 250, 400, 600  | от 1000 пф до 0,5 мкф  |
| МПГО             | 160, 250, 400  | от 0,5 до 10 мкф       |
| К71П-2А          | 500, 1000      | от 3000 пф до 0,02 мкф |
| К71П-2Б          | 250, 500, 1000 | от 0,015 до 2 мкф      |

Металлопленочные конденсаторы могут быть использованы в цепях переменного и пульсирующего напряжения. При этом сумма напряжения постоянного тока и амплитудное значение переменной составляющей не должны превышать номинального напряжения. Допустимые значения переменной составляющей приведены в табл. 31.

Однослойные конденсаторы выпускают с отклонением емкости от номинальной  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  и  $\pm 20\%$ , а многослойные конденсаторы с отклонением  $\pm 2\%$ ,  $\pm 5\%$  и  $\pm 10\%$ ; по согласованию с поставщиком конденсаторы могут быть изготовлены и с меньшим допуском по емкости.

Норма на тангенс угла потерь при частоте 1000 гц для однослойных конденсаторов составляет не более 0,0015 и для многослойных — не более 0,001.

Сопротивление изоляции при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  для конденсаторов малых емкостей (до  $0,2\text{ мкф}$ ) гарантируется не ниже  $50\,000\text{ Мом}$ , постоянная времени для конденсаторов большей емкости должна быть не менее  $10\,000\text{ Мом}\cdot\text{мкф}$ .

Интервал рабочих температур ограничен пределами от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ , небольшой верхний предел опреде-

Таблица 31

Допустимые величины амплитудного значения напряжения переменного тока для металлопленочных конденсаторов, в

| Номиналь-<br>ное напря-<br>жение, в | Частота            |                                          |                                         |
|-------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                     | до $500\text{ гц}$ | от $500\text{ гц}$<br>до $10\text{ кгц}$ | от $10\text{ кгц}$<br>до $1\text{ Мгц}$ |

МПО и МПГО

|     |     |     |    |
|-----|-----|-----|----|
| 160 | 100 | 20  | —  |
| 250 | 200 | 50  | —  |
| 400 | 250 | 100 | 20 |
| 60  | 250 | 100 | 20 |

К71П-2

|      |     |     |    |
|------|-----|-----|----|
| 250  | 125 | 100 | —  |
| 500  | 250 | 100 | 50 |
| 1000 | 500 | 100 | 50 |

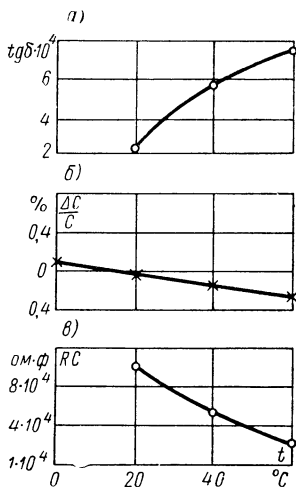


Рис. 94. Зависимость тангенса угла потерь (а), емкости (б) и постоянной времени (в) металлопленочных конденсаторов типа К71П-2 от температуры (Михайлова, Северюхина).

ляется низкой нагревостойкостью полистирольной пленки.

Изменение электрических характеристик с температурой приведено на рис. 94, из которого видно, что емкость с повышением температуры несколько снижается. Температурный коэффициент емкости отрицателен и по абсолютному значению не превышает  $200 \cdot 10^{-6}\text{ град}^{-1}$ .

Тангенс угла потерь с повышением температуры немного возрастает, но при  $+60^{\circ}\text{C}$  обычно не превышает 0,0015.

Сопротивление изоляции с повышением температуры снижается, но даже при температуре  $60^{\circ}\text{C}$  его значение

лежит не ниже 25 000 *Мом* для конденсаторов емкостью 0,2 *мкф* и меньше; для конденсаторов емкостью 0,25 *мкф* и более величина постоянной времени при  $+60^{\circ}\text{C}$  не ниже 5000 *Мом·мкф*.

Изменение электрических характеристик во время эксплуатации незначительно; предприятие-изготовитель гарантирует изменение емкости не более  $\pm 2\%$  сверх значений, указанных в маркировке для конденсаторов МПО и МПГО после 2000 часов эксплуатации и 8 лет хранения, а для конденсаторов К73П-2 после 8000 часов эксплуатации и 10 лет хранения.

Постоянная времени после вышеуказанных сроков эксплуатации и хранения гарантируется не ниже 1000 *Мом·мкф* для однослойных конденсаторов и не ниже 2500 *Мом·мкф* для многослойных конденсаторов.

Удельные объемы металлопленочных конденсаторов этого типа в 3—5 раз меньше объема пленочных конденсаторов с фольговыми обкладками, но заметно увеличены в сравнении с металлобумажными.

#### **§ 46. Конденсаторы с пленочным диэлектриком для работы при повышенных значениях частоты и температуры**

Для работы в электрических цепях звуковых частот и при повышенных температурах разработаны конденсаторы с диэлектриком из фторопласта 4, в которых в качестве обкладок использована металлизированная с двух сторон конденсаторная бумага. Такое сочетание позволяет получить конденсатор с малыми потерями в диэлектрике при повышенных частотах, обладающий в то же время свойством самовосстановления при пробое, за счет наличия в нем тонких обкладок, как и в обычных металлобумажных конденсаторах. Следует отметить, что для непосредственной металлизации фторопласт 4 мало пригоден.

Конденсаторам присвоено наименование ФЧ — фторопластовые частотные. Высокая нагревостойкость и малая зависимость диэлектрических потерь фторопласта 4 от температуры позволяют использовать конденсаторы ФЧ при температуре до  $+125^{\circ}\text{C}$ , а кратковременно и при температуре до  $+155^{\circ}\text{C}$ .

Конденсаторы ФЧ выпускают в цилиндрических корпусах. Секции перед заделкой в корпуса подвергают вакуумной сушке и пропитке конденсаторным маслом.

Конденсаторная бумага, несущая обкладку при пропитке секции, выполняет роль фитиля и обеспечивает проникновение масла между слоями пленки, разделенными этой бумагой. Это необходимо в связи с тем, что пленка плохо смачивается маслом.

Дальнейшая технология изготовления конденсаторов ФЧ принципиально не отличается от технологии изготов-

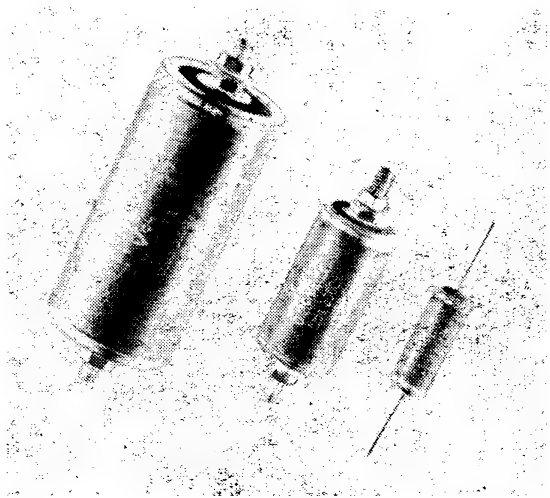


Рис. 95. Общий вид конденсаторов ФЧ.

ления металlobумажных конденсаторов, но пленки фторопласта 4 в процессе нагревания дают значительную усадку, что препятствует в дальнейшем удалению влаги и проникновению масла, поэтому их сушку и пропитку сначала ведут при пониженной температуре порядка  $70\text{--}80^\circ\text{C}$  и лишь в конце цикла производят прогрев под вакуумом при температуре  $125^\circ\text{C}$ .

Конденсаторы ФЧ выпускают в алюминиевых корпусах с уплотнением торцов маслостойкой резиной или в стальных корпусах с крышкой, приваренной шовной сваркой. Общий вид конденсаторов ФЧ приведен на рис. 95. Эти конденсаторы разработаны для номинальных напряжений от 60 до 200 в, которые определены из условий работы при температуре  $125^\circ\text{C}$  и частоте 5 кГц. Толщина диэлектрика, средняя напряженность электрического поля и габаритные размеры конденсаторов ФЧ приведены в табл. 32 и 33.

Удельное сопротивление фторопласта 4 велико, но изготовленные из этого материала тонкие пленки имеют большое число сквозных отверстий и проводящих включений. В связи с этим при изготовлении однослойных конденсаторов типа ФЧ наблюдались низкие значения сопротивления изоляции, особенно при небольших номинальных напряжениях, когда использовалась пленка малой толщины. Для конденсаторов с пленкой 6 мк, рассчитанных на напряжение 60 в, постоянная времени составляет 10—1000 Мом × мкф, а при толщине пленки 20 мк ( $U_{\text{ном}} =$

Таблица 32

Толщина диэлектрика и средняя напряженность поля в конденсаторах ФЧ

| Номинальное напряжение<br>в | Толщина диэлектрика<br>мк | Средняя напряженность электрического поля<br>кв/мм |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| 60                          | 6                         | 10                                                 |
| 125                         | 10                        | 12,5                                               |
| 200                         | 20                        | 10                                                 |

$= 200$  в) повышается до 2000—10 000 Мом·мкф.

Техническими условиями на конденсаторы ФЧ постоянные времени не нормируются, поскольку они пред-

Таблица 33

Габаритные размеры конденсаторов ФЧ

| C, мкф | Номинальное напряжение, в |              |              |
|--------|---------------------------|--------------|--------------|
|        | 60                        | 125          | 200          |
|        | Размеры, мм               |              |              |
|        | $d \times l$              | $d \times l$ | $d \times l$ |
| 0,1    | —                         | —            | 30×55        |
| 0,25   | —                         | 28×55        | 32×94        |
| 0,5    | 28×42                     | 38×55        | 42×94        |
| 1      | 30×55                     | 36×94        | 62×94        |

назначены для работы на повышенных частотах, когда данный параметр оказывается не характерным для оценки качества конденсаторов.

Конденсаторы ФЧ выпускают с отклонением емкости от номинальной равным  $\pm 10$  и  $\pm 20\%$ . С повышением температуры емкость этих конденсаторов незначительно снижается. При нагревании до  $100^\circ \text{C}$  снижение емкости

обычно не превышает 1—2%. Технические условия оговаривают отрицательный температурный коэффициент емкости, имеющий в интервале температур от  $-60$  до  $+155^{\circ}\text{C}$  абсолютное значение не более  $500 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ .

Тангенс угла потерь конденсаторов ФЧ при частоте 1000  $\text{гц}$  гарантируется не более  $5 \cdot 10^{-4}$  при комнатной температуре и не более  $10 \cdot 10^{-4}$  при  $+155^{\circ}\text{C}$ .

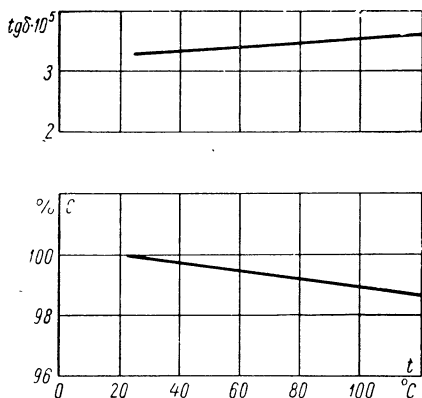


Рис. 96. Зависимость емкости и тангенса угла потерь конденсаторов ФЧ от температуры (Вахтель).

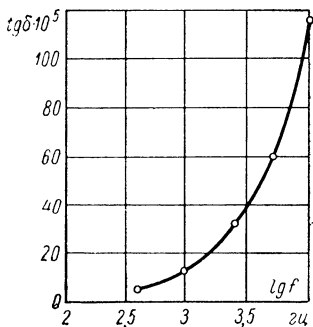


Рис. 97. Зависимость тангенса угла потерь конденсаторов ФЧ от частоты (Вахтель).

Изменение емкости и тангенса угла потерь конденсаторов ФЧ с изменением температуры приведено на рис. 96.

Зависимость тангенса угла потерь от частоты приведена на рис. 97. Как видно из этого рисунка, тангенс угла потерь конденсаторов ФЧ с повышением частоты возрастает и при частоте 10  $\text{кгц}$ , при комнатной температуре, достигает значения  $12 \cdot 10^{-4}$ .

В зависимости от частоты приложенного напряжения и окружающей температуры предельно допускаемое напряжение изменяется. При повышении частоты и постоянной температуре рабочее напряжение должно быть снижено настолько, чтобы количество тепла, выделяющееся в конденсаторе, не превышало того количества, которое соответствует номинальному напряжению при частоте 5  $\text{кгц}$ . При более низких температурах и частотах рабочее напряжение можно увеличить, но не свыше 350  $\text{в}$ , чтобы не

возникало условий для развития ионизационных процессов.

Предельно допустимые напряжения для конденсаторов ФЧ при различных температурах и частотах приведены в табл. 34.

Таблица 34

**Допустимые напряжения для конденсаторов ФЧ  
при различных температурах и частотах в %**

| Температура<br>°С | Частота, кГц                               |     |     |    |    |
|-------------------|--------------------------------------------|-----|-----|----|----|
|                   | 1                                          | 2   | 5   | 10 | 20 |
|                   | Допускаемое напряжение в % от номинального |     |     |    |    |
| До 100            | 200                                        | 150 | 125 | 80 | 40 |
| 100—125           | 150                                        | 125 | 100 | 50 | 25 |
| 125—155           | 125                                        | 100 | 75  | 30 | 10 |

\* При частотах 10—20 кГц приведены расчетные значения допускаемого напряжения.

При использовании конденсаторов ФЧ в пульсирующем режиме постоянная составляющая не должна превышать 50% от номинального напряжения, а сумма постоянной составляющей и амплитудного значения переменной составляющей не должны превышать допустимого напряжения для той частоты, которую имеет переменная составляющая.

Техническими условиями установлены следующие сроки службы конденсаторов ФЧ: при 155° С не более 150 часов, а при 100° С не более 500 часов.

Таблица 35

**Сравнение удельных объемов конденсаторов ФЧ и МБГЧ  
при номинальном напряжении 125 в**

| Емкость,<br>мкф | Конденсаторы ФЧ при<br>5 кГц   |                         |                                  | Конденсаторы МБГЧ при<br>500 гц |                         |                                  |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|                 | объем<br>$V$ , см <sup>3</sup> | мощность<br>$P_R$ , вар | $V_{уд}$<br>см <sup>3</sup> /вар | объем<br>$V$ , см <sup>3</sup>  | мощность<br>$P_R$ , вар | $V_{уд}$<br>см <sup>3</sup> /вар |
| 0,25            | 34                             | 19,6                    | 1,74                             | —                               | —                       | —                                |
| 0,5             | 62                             | 39,2                    | 1,58                             | 12,4                            | 3,92                    | 3,17                             |
| 1,0             | 96                             | 78,4                    | 1,23                             | 24,0                            | 7,84                    | 2,07                             |
| 2,0             | —                              | —                       | —                                | 36,8                            | 15,7                    | 2,35                             |

Сопоставление значений допускаемой мощности и удельных объемов конденсаторов ФЧ и МБГЧ сделано в табл. 35.

Допустимые нагрузки для конденсаторов МБГЧ соответствуют температуре  $70^{\circ}\text{C}$  и частоте 500 *гц*, а для конденсаторов ФЧ — температуре  $125^{\circ}\text{C}$  и частоте 5 *кгц*.

Как видно из таблицы, конденсаторы ФЧ допускают удельную нагрузку, примерно в два раза большую при температуре  $125^{\circ}\text{C}$ , чем МБГЧ при температуре  $70^{\circ}\text{C}$ .

#### **§ 47. Металлизированные пленочные конденсаторы за рубежом**

Многие фирмы в США и Англии широко рекламируют конденсаторы с пленочным металлизированным диэлектриком. Так, фирмы «Гопкинс» и «Астрон» сообщают о выпуске конденсаторов на основе металлизированной пленки «майлар» (фирменное название пленки из полиэтилентерефталата) фирма «Хэнт» в каталоге на конденсаторы с металлизированным пленочным диэлектриком приводит изменение электрических характеристик конденсаторов от температуры, из которых видно, что в качестве диэлектрика используется полиэтилентерефталат и стирофлекс.

Габаритные размеры конденсаторов различных фирм с металлизированным пленочным диэлектриком из полиэтилентерефталата приведены в табл. 36.

Из сопоставления данных табл. 28 и 36 видно, что металлопленочные конденсаторы с диэлектриком из полиэтилентерефталатной пленки имеют, примерно, такие же размеры, как металлобумажные конденсаторы.

Различные фирмы указывают для выпускаемых ими металлизированных полиэтилентерефталатных конденсаторов различные пределы рабочего интервала температур. Так, фирма «Астрон» указывает интервал рабочих температур от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  без снижения напряжения.

Фирма «Гопкинс» оговаривает допустимость использования металлопленочных конденсаторов без снижения напряжения в интервале температур от  $-55$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  и при использовании в интервале от  $+100$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  со снижением рабочего напряжения до 50% от номинального.

Фирма «Хэнт» оговаривает возможность применения металлопленочных конденсаторов без снижения напряжения при температурах до  $+85^{\circ}\text{C}$  и при снижении напряжения на 15—20% до  $-100^{\circ}\text{C}$ .

## Габаритные размеры металлопленочных конденсаторов

| Номинальные характеристики конденсаторов |        | Наименование фирмы        |      |        |      |           |      |
|------------------------------------------|--------|---------------------------|------|--------|------|-----------|------|
|                                          |        | «Астрон»                  |      | «Хэнт» |      | «Гопкинс» |      |
|                                          |        | Размеры конденсаторов, мм |      |        |      |           |      |
| U, в                                     | C, мкф | d                         | l    | d      | l    | d         | l    |
| 200                                      | 0,005  | —                         | —    | 5,2    | 11,1 | 4,45      | 19,0 |
|                                          | 0,01   | 6,0                       | 19,0 | 5,2    | 11,1 | 4,45      | 19,0 |
|                                          | 0,02   | 6,0                       | 19,0 | 6,8    | 14,3 | 4,45      | 19,0 |
|                                          | 0,03   | 6,0                       | 19,0 | 6,8    | 14,3 | 4,45      | 19,0 |
|                                          | 0,05   | 7,95                      | 22,2 | 7,14   | 25,4 | 4,95      | 19,0 |
|                                          | 0,1    | 7,95                      | 22,2 | 8,74   | 25,4 | 7,92      | 22,2 |
|                                          | 0,25   | 10,2                      | 28,6 | 11,9   | 25,4 | 10,2      | 22,2 |
|                                          | 0,5    | 12,7                      | 28,6 | 11,9   | 38,1 | 10,2      | 28,5 |
| 400                                      | 1      | 14,3                      | 28,6 | 14,3   | 38,1 | 12,7      | 33,4 |
|                                          | 0,005  | —                         | —    | 6,8    | 14,3 | 4,45      | 19,0 |
|                                          | 0,01   | 7,95                      | 22,2 | 6,8    | 14,3 | 4,45      | 19,0 |
|                                          | 0,05   | 10,2                      | 28,6 | —      | —    | 7,94      | 22,2 |
|                                          | 0,1    | 12,7                      | 28,6 | —      | —    | 10,2      | 22,2 |
|                                          | 0,5    | 17,0                      | 41,2 | —      | —    | 14,3      | 47,6 |
|                                          | 1      | 19,0                      | 47,7 | —      | —    | 17,0      | 47,6 |

Постоянная времени при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  для металлопленочных конденсаторов гарантируется не ниже  $2000 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ ; при  $125^{\circ}\text{C}$  фирма «Гопкинс» указывает норму  $100 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ , а фирма «Хэнт» при  $100^{\circ}\text{C}$  гарантирует 0,45% от значения при  $20^{\circ}\text{C}$ , т. е. около  $10 \text{ Мом} \cdot \text{мкф}$ .

Емкость металлопленочных конденсаторов с диэлектриком из полиэтилентерефталата падает с понижением температуры и растет с ее повышением.

По данным фирмы «Гопкинс» при снижении температуры от  $+25^{\circ}\text{C}$  до  $-55^{\circ}\text{C}$  емкость падает на 6%; с повышением температуры от  $+25^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  емкость увеличивается на 6%, при дальнейшем повышении температуры емкость начинает быстро возрастать и при  $125^{\circ}\text{C}$  увеличение емкости достигает 15—25% от значения при  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Величина тангенса угла потерь при частоте  $1 \text{ кгц}$  оговаривается не более 0,01. Кривая зависимости тангенса угла потерь от температуры имеет минимум; по данным фирмы «Гопкинс» этот минимум происходит при  $0^{\circ}\text{C}$ , по данным фирмы «Астрон» при  $35-40^{\circ}\text{C}$ , а по данным фирмы «Хэнт» при  $55^{\circ}\text{C}$ .

Данные об изменении электрических характеристик металлопленочных конденсаторов в зависимости от времени эксплуатации в рекламной литературе не приведены, так же как не указывается и срок службы этих конденсаторов; поэтому не представляется возможным дать оценку их эксплуатационным характеристикам.

Наряду с выпуском металлопленочных конденсаторов из полистирольной и полиэтилентерефталатной пленок, за рубежом начато изготовление таких конденсаторов и из поликарбонатной пленки.

Следует также отметить тонкопленочные металлизированные конденсаторы из пленок ацетилцеллюлозы с толщиной 2,5—3 *мк*, а также конденсаторы из алюминиевой фольги, покрытой слоем лака на основе полиуретана, поверх которого наносят слой металлизации («металлолаковые конденсаторы»).

Малая толщина диэлектрика в конденсаторе этих двух типов позволяет заметно снизить удельный объем в сравнении с однослойными бумажными конденсаторами, достигая значений порядка 1 *см<sup>3</sup>/мкф*.

Фирма «Хэнт» также сообщает о выпуске конденсаторов из металлизированной бумаги совместно с синтетической пленкой.

Поскольку конструкция предусматривает применение в качестве диэлектрика не менее одного слоя бумаги и одного слоя пленки, конденсаторы при наименьших толщинах бумаги и пленки выдерживают достаточно высокие напряжения; в связи с этим наименьшее номинальное напряжение для этих конденсаторов указано равным 600 *в*.

Постоянная времени металлизированных конденсаторов с комбинированным диэлектриком из синтетической пленки и бумаги гарантируется не ниже 2000 *Мом·мкф* при 20° С.

Интервал рабочих температур, по-видимому, определяется сортом примененной пленки и для конденсаторов типа WF311 составляет от —10° С до +85° С, а для конденсаторов типа WF312 от —40° С до +100° С.

Фирма сообщает о выпуске таких конденсаторов только с относительно малыми емкостями, например, при номинальном напряжении 600 *в* выпускают конденсаторы емкостью от 0,015 *мкф* до 0,47 *мкф*.

Размеры конденсатора емкостью 0,25 *мкф* при напряжении 600 *в* равны:  $\varnothing = 18,3$  *мм*,  $L = 38$  *мм*, что несколько

больше, чем для отечественных конденсаторов МБМ с номинальным напряжением 750 в емкостью 0,25 мкф.

Изменение емкости конденсаторов типа WF311 приведено на рис. 98, а и WF312 на рис. 98, б.

Кривые рис. 98 показывают, что, комбинируя пропитанную бумагу с различными пленочными диэлектриками, можно получать конденсаторы с различной зависимостью

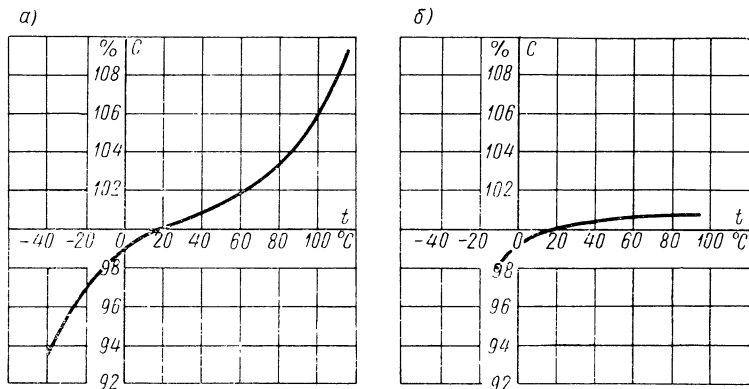


Рис. 98. Зависимость емкости конденсаторов фирмы «Хэнт» от температуры: а — тип WF311; б — тип WF312.

емкости от температуры, причем можно достигать малых значений температурного коэффициента емкости, чего не удастся при использовании однородного диэлектрика. Сопротивление изоляции конденсаторов с комбинированным диэлектриком значительно выше, чем с чисто бумажным диэлектриком.

Следовательно, имеются еще большие возможности по улучшению электрических характеристик металлизированных конденсаторов путем использования в качестве диэлектрика органической пленки или конденсаторной бумаги совместно с органическими пленками.

## ЛИТЕРАТУРА

### По металлобумажным конденсаторам

1. В. Т. Р е н н е, Алюминиевая фольга для конденсаторов, «Легкие металлы», 1937, № 4, стр. 22.
2. В. Т. Р е н н е, Самовосстанавливающиеся бумажные конденсаторы, «Электричество», 1946, № 8, стр. 95 (реф.).
3. В. Т. Р е н н е, Конденсаторы без фольги, «Электричество», 1947, № 7, стр. 89 (реф.).
4. В. Т. Р е н н е, Характеристики конденсаторов из металлизированной бумаги, «Электричество», 1947, № 9, стр. 83 (реф.).
5. В. Т. Р е н н е, Конденсаторы из металлизированной бумаги (Конденсаторы МП), в книге «Современные бумажные конденсаторы», Госэнергоиздат, 1948, стр. 139—161.
6. В. Т. Р е н н е, Металлизация конденсаторной бумаги, «Вестник информации», «Советское радио», 1950, № 3, стр. 15.
7. В. Т. Р е н н е, Конденсаторы из металлизированной бумаги, «Вестник информации», «Советское радио», 1950, № 23, стр. 15.
8. В. Т. Р е н н е, Металлобумажные конденсаторы, «Электричество», 1951, № 5, стр. 80.
9. В. Т. Р е н н е, Конденсаторы из металлизированной бумаги, в книге «Электрические конденсаторы», Госэнергоиздат, 1952, стр. 343—352.
10. З. В. Е р ю х и н а, К вопросу повышения напряжения теплового пробоя металлобумажных конденсаторов, ЖТФ, 1957, т. 27, № 9, стр. 2038.
11. В. Т. Р е н н е, Металлобумажные конденсаторы, в книге «Электрические конденсаторы», Госэнергоиздат, 1959, стр. 470—489.
12. В. Т. Р е н н е, Силовые металлобумажные конденсаторы, «Электричество», 1959, № 8, стр. 73.
13. G. M a n s b r i d g e, Manufacture of electric condensers, «J. IEE», 1908, v. 41, p. 535.
14. Selfhealing paper condensers, «Wireless World», 1945, v. 51, № 7.
15. Capacitors without foil, «Electronics», 1946, v. 19, № 5, p. 303.
16. Metallized capacitors, «Electronics», 1946, v. 19, № 12, p. 260.
17. Metallized capacitors data, «Electronics», 1947, v. 20, № 3, p. 174.
18. P. G o d l e y, J. B a l s b a u g h, Metallized capacitors tests, «Electronics», 1947, v. 20, № 4, p. 112.
19. J. C o r n e l l, Metallized capacitor dielectrics, «Tele-Tech», 1947, v. 6, № 1, p. 98.

20. H. W e h e, Metallizing paper for capacitors, «Bell Lab. Record», 1949, v. 27, № 9, p. 317.
21. H. S t r ä b, Metallpapier Kondensatoren, «ETZ», 1949, Bd. 70, S. 287.
22. A. H u n t, Metallized paper capacitors, «Wireless World», 1949, December, p. 10.
23. H. S t r ä b, MP-Kondensatoren, «Der Elektrotechniker», 1950, Bd. 2, № 10.
24. D. M c L e a n, Metallized paper for capacitors, «Proceed. IRE», 1950, v. 38, № 9, p. 1010.
25. P. H e n n i g, Neue Bauformen von MP-Kondensatoren, «ETZ», 1950, Bd. 71, № 8—9, S. 196.
26. J. W e e k s, Metallized paper capacitors, «Proceed. IRE», 1950, v. 38, № 9, p. 1015.
27. J. F i s c h e r, Metallized paper capacitors, «Electronics», 1950, v. 38, № 10, p. 122.
28. L. K a h n, High temperature operation of metallized paper capacitors, «Proceed. NEC» (Chicago), 1951, v. 7, p. 561.
29. C. E v e n s o n, Metallized paper capacitors, «Bell Lab. Record», 1951, v. 29, № 2, p. 56.
30. H. E l s n e r, Metallisierte Papier-Kondensatoren, «Bull. Schweiz. El. Ver.», 1952, Bd. 43, № 9, S. 721.
31. P. H e n n i g e r, Entwicklungslinien auf dem Gebiet der elektrischen Bauelementen der Nachrichtentechnik, «Frequenz», 1953, № 7, S. 345.
32. J. B u r n h a m, Breakdown and leakage investigation of metallized paper capacitors, «Trans. IRE», 1954, March, NPGCP-1, 3147.
33. L. H o l l a n d, K. H a c k i n g, The zinc coating of paper for capacitors by vacuum evaporation, «El. Engineering», 1954, № 317, p. 296.
34. C. C h a r l t o n, Selfhealing in metallized paper capacitors, «TMC Techn. Journal», 1955, № 6, p. 27.
35. H. S t r ä b, Die Selbstheilung von MP-Kondensatoren und ihre Auswirkung im Dauerlauf, «Elektronische Rundschau», 1955, № 1, S. 33.
36. H. S t r ä b, Selbstheilende Kondensatoren, «VDE-Fachberichte», 1956, Bd. 29, № 6, S. 222.
37. F. B r a d a, Fèmezetti papir kondenzátorok, «Magyar Tud. Akad. Műz. oszt. Köz», 1956, 20, № 1—2.
38. P. H e n n i g e r, G. K r e m l i n g, H. E i s e n l o h r, Dielektrische Untersuchungen im Dienste der Bauelementeentwicklung, «Frequenz», 1956, № 8, S. 241.
39. H. G a v i ñ o, Los condensadores electrostaticos su application a la factor de potencia, «Tecn. Industr.», 1956, v. 5, № 23, p. 118.
40. P. G r a d, New subminiature metallized paper capacitors, «IRE Nat. Convent. Rec.», 1957, v. 5, № 6, p. 80.
41. H. S t r ä b, Selbstheilende Metallpapier-Kondensatoren für Gleichspannung, «El. und Maschinenbau», 1957, Bd. 74, № 18, S. 408.
42. J. M a y e u r, Les condensateurs au papier métallisé et leurs emploi dans le materiel de transmission, «L'Onde Electrique», 1957, v. 37, № 360, p. 299.
43. Neue Metallpapier MP-Kondensatoren, «Elektro-Anzeiger», 1957, № 30, S. 273.

44. K. K u d o, On the laquers, used in the capacitor production, «Monthly J. Electr. Commun. Lab.», 1957, v. 10, № 2, p. 53 (Japan).

45. K. K u d o, Development of metallized paper condensers, «Repts. El. Commun. Lab.», 1957, v. 5, № 8, p. 18 (Japan).

46. K. K u d o, Laquer for metallized paper condensers, «Repts. El. Commun. Lab.», 1957, v. 5, № 8, p. 18.

47. H. S t r ä b, H. M a y l a n d t, Present stage of the technique of metallized paper capacitors for power systems, «CIGRE», 1958, Juin, paper 109.

48. P. H e n n i g, Schutzeinrichtung für Leistungs-Kondensatoren, «ETZ-B», 1958, Bd. 10, № 12, S. 467.

49. W. L a m p h i e r, Some guideposts to the use of metallized capacitors, «IRE Nat. Convent. Rec.», 1958, v. 6, № 6, p. 207.

50. H. S t r ä b, Selbstheilende Metallpapier-Kondensatoren für Wechselspannung, «El. und Maschinenbau», 1959, Bd. 76, n 5, S. 105.

51. W. A c k m a n n, Lebensdaueruntersuchungen an Kondensatoren, «NTZ», 1960, Bd. 13, № 11, S. 513.

52. Nennspannungen bei MP-Kondensatoren, «Elektronik», 1960, Bd. 9, № 7, S. 224.

53. C h o r i i K e n d s i, Metallized paper capacitors, «Bull. El. Commun. Lab.», 1961, v. 25, № 1, p. 921 (Japan).

54. H. S t r ä b, Praktische Erfahrungen über die Zuverlässigkeit von MP-Kondensatoren, «Nachricht. Techn. Fachberichte», 1961, Bd. 24, S. 103.

55. S a i t o N o b o r u, Dessication of paper for metallized capacitors, «Vacuum Chem.», 1961, v. 9, № 3, p. 97 (Japan).

56. R. G a l a, Zuverlässigkeit und Lebensdauerverhalten von elektrischen Bauelementen, «Techn. Rundschau», 1961, Bd. 53, № 37, S. 7.

57. E t o M a s a o, Metallized paper condensers, «Telev. Transist. and Electron.», 1961, v. 9, № 1, p. 53 (Japan).

58. H. H a y w a n g, H. P r e s s i n g e r, Selbstheilender Durchschlag in Metallpapier-Kondensatoren, «Siemens Zeitschrift», 1961, Bd. 35, № 6, S. 493.

59. T. E i l o a r t, Metallized capacitors. Their characteristics and construction, «Electrical Industries Export», 1962, v. 62, № 6, p. 43.

60. A. N e w, A. L y n c h, The failure of metallized paper capacitors used with large series resistances, «Proceed. IEE», 1962, v. 109, № 22, suppl., p. 496.

61. R. B e h n, H. H e y w a n g, J. K a m m e r m a i e r, H. P r e s s i n g e r, Elektrochemische Selbstheilung in Kondensatoren mit metallisierten Dielektrikum, «Siemens Zeitschrift», 1962, Bd. 36, Nr 11, S. 808.

62. E. H o f e r, Metallpapier-Kondensatoren und ihre Anwendung, «Elektrizitäts-Verwendungen», 1962, Bd. 37, Nr 3—4, S. 65.

63. K a d z i k a w a K a o r u, T e d z u k a H i d e o, Capacitors of metallized paper, «Electron. Engng.», 1962, v. 4, № 6, p. 28 (Japan).

64. H. A r n d t, Probleme beim Wickeln von Kondensatoren, «Elektrie», 1962, Bd. 16, Nr. 2, S. 9.

65. R. H o u z, Les condensateurs au papier métallisé, «Liais Helge», 1963, № 11, p. 84.

66. W. A c k m a n n, Zeitraffende Zuverlässigkeitsuntersuchun-

gen an zweilagigen Metallpapier-Kondensatoren, «NTZ», 1963, Bd. 16, Nr 10, S. 513.

67. C. H u r a u x, Les condensateurs au papier métallisé, «Revue Gener. Electricité», 1963, v. 72, № 11, p. 535.

68. H. H e y w a n g, H. P r e s s i n g e r, MP-Impuls-Kondensatoren mit kleiner Selbstinduktivität, «Siemens Zeitschrift», 1964, 38, Nr. 5, 376—380.

### По металлопленочным конденсаторам

1. В. Т. Р е н н е, Новый тип малогабаритного конденсатора — металлолаковый, «Электричество», 1960, № 4, стр. 77.

2. В. Т. Р е н н е, «Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком», Госэнергоиздат, 1963 (О металлопленочных конденсаторах см. стр. 22—24, 31, 39, 43—45, 47, 56, 138—139, 179—188, 190—192).

3. H. W e h e, Making metallized laquerfilm capacitors, «Electronics», 1956, v. 29, № 6, p. 222.

4. Der ML-Kondensator — ein weiteres Bauteil für elektronische Geräte, «Elektronik», 1959, Bd. 8, Nr 4, S. 121.

5. C. D e l l a G i o v a n n i, Nuovi condensatori per apparecchiature elettroniche, «L'Elettrotecnica», 1959, v. 44, № 8, bis, p. 598.

6. H. W e h e, J. W e r n e r, A miniature laquer-film capacitor, «Bell. Lab. Record», 1960, v. 38, № 1, p. 19.

7. Kondensatory ML, «Sdèlovaci Technika», 1960, № 7, s. 268 (ČSSR).

8. Metallisierte Kunststoff-Kondensatoren, «Export-Markt Elektrotechnik», 1962, Bd. 42, Nr. 21, S. 17.

9. D. C i r l i n g, E. S m i t h, The coated-foil capacitor, «Proceed. IEE», 1962, v. 109, № 22 (suppl.).

10. Quality capacitors in quantity, «Brit. Commun. & Electron.», 1962, v. 9, № 5, p. 3.

11. Selbstheilende Metall-Lack-Kondensatoren, «NTZ», 1962, Nr. 4, S. 196.

12. Neue Metall-Lack-Kondensatoren, «Elektronik», 1962, Nr. 5, S. 152.

13. H. S c h i l l, Neue Entwicklungen an Dünnschicht-Kondensatoren, «VDE-Fachberichte», 1962, Bd. 22, 11.1—5, «NTZ», 1962, Bd. 15, S. 549.

14. P. H e n n i g e r, Über die Entwicklung eines regenerierendes Kondensators auf Polystyrolbasis, «Frequenz», 1963, Bd. 17, Nr 9, S. 319.

15. O. W i e g a n d, Kunststoff-Kondensatoren, «Siemens Zeitschrift», 1963, Bd. 37, Nr. 10, S. 861.

16. New metallized polycarbonat capacitor is small and selfhealing, «Bell Lab. Record», 1963, v. 41, № 9, p. 353.

17. J. K a m m e r m e i n e r, Untersuchungen der Umsetzungsprozesse bei Durchschlagen in Kondensatoren mit metallisierten Dielektrikum, «Frequenz», 1964, 18, Nr. 5, 145—150.

### По смежным вопросам

1. Я. И. Ф р е н к е л ь, Теория явлений конденсации и адсорбции, «Журн. Русск. физ.-хим. об-ва», часть физ., 1924, т. 56. вып. 1.

2. В. Эспе, М. Кноль, «Технология электровакуумных материалов», Оборонгиз, 1939.
  3. С. Н. Ушаков, «Эфиры целлюлозы и пластические массы на их основе», Госхимиздат, 1941.
  4. С. А. Векшинский, Новый метод металлографического исследования сплавов, ОГИЗ, Гостехиздат, 1944.
  5. Д. Стронг, Техника физического эксперимента, Ленгиздат, 1949.
  6. Г. И. Сканава, Физика диэлектриков, (Область слабых полей), Гостехиздат, 1949.
  7. В. Т. Ренне, Расчет диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги, «Электричество», 1949, № 1.
  8. А. В. Лыков, Теория сушки, Госэнергоиздат, 1950.
  9. М. И. Шахрай, Передовые технологические процессы в машиностроении, Машгиз, 1950.
  10. К. И. Гурович, В. В. Скорчелетти, Коррозия металлов, Госхимиздат, 1952.
  11. В. Т. Ренне, Г. С. Кучинский, В. М. Файницкий, Выбор толщины диэлектрика для бумажных силовых конденсаторов, «Электричество», 1954, № 6.
  12. И. Д. Кононенко, Физика тонких металлических и полупроводниковых слоев, «Успехи физических наук», 1954, т. 52, вып. 4.
  13. А. К. Герцик, Ионизационные характеристики бумажно-масляной изоляции конденсаторов при искаженной кривой воздействующего напряжения, «Изв. НИИ Пост. тока», 1958, № 8.
  14. Б. П. Бурьянов, Трансформаторное масло, Госэнергоиздат, 1952.
  15. М. И. Виноградов, Техника испарения металлов в вакууме, «Приборы и техника эксперимента», 1960, № 4.
  16. R. Picard, O. Duffendack, A study of the structure of thin metallic films with an electronic microscope, «J. of Appl. Phys.», 1943, v. 14, p. 291.
  17. L. Olsen, C. Smith, E. Crittenden, Techniques for evaporation of metals, «J. Appl. Phys.», 1945, v. 16, № 7, p. 425.
  18. N. Foote, Vacuum drying of paper, «Ind. & Engng Chemistry», 1947, v. 39, № 12, p. 1642.
  19. E. Murphy, Gases evaluated by thermal decomposition of paper, «Trans. El. Chem. Soc.», 1943, p. 161.
  20. D. McLean, Adsorbed moisture in insulation, «Bell Lab. Record», 1948, v. 26, n 4, p. 17.
  21. D. McLean & others, Microstructure of capacitor paper, «Ind. & Engng Chemistry», 1953, v. 45, № 8, p. 603.
  22. P. Chen, Physicochemical model of thin film deposition by vacuum evaporation, «Amer. Phys. Soc.», 1963, v. 8, № 8, p. 608.
  23. F. Jones, K. Wood, The melting point of thin aluminium films, «J. Appl. Phys.», 1964, v. 15, № 2, p. 185.
-

*Тороцин Павел Алексеевич*

МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

М.—Л. издательство «Энергия», 1965 г.  
213 стр. с рис.

Сводный тематический план  
по радиоэлектронике и связи 1965 г. № 142<sup>1</sup>

Научный редактор *В. Т. Ренне*  
Редактор *Т. Д. Раскина*  
Корректоры *Р. И. Геллер, Э. А. Любченко*  
Технический редактор *Е. М. Соболева*

---

Сдано в производство 30/XI 1964 г.  
Подписано к печати 5/III 1965 г. М-20381.

Печ. л. прив. 11,07. Бум. л. 3,38

Уч.-изд. л. 11. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Заказ 2134.  
Тираж 4700 экз. Цена 75 коп.

---

Ленинградская типография № 6  
Главполиграфпрома  
Государственного комитета  
Совета Министров СССР по печати  
Ленинград, ул. Моисеенко, 10